



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

GRADO EN CIENCIAS I TECNOLOGÍAS DE LA EDIFICACIÓN

TRABAJO FINAL DE GRADO

MEJORA DEL COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE LA MADERA MEDIANTE LA IMPREGNACIÓN CON DIFERENTES PRODUCTOS

Proyectista: Carmen Isábal Revilla

Directores: Laia Haurie Ibarra

Joaquín Montón Lecumberri

Convocatoria: Abril 2015

RESUMEN

Este proyecto pretende estudiar y analizar las posibles mejoras del comportamiento de la madera frente al fuego mediante la impregnación con diferentes productos, intentando retardar el tiempo de ignición en el material y la propagación de la llama para que la madera mantenga sus propiedades iniciales durante el mayor tiempo posible.

Para ello, se han seleccionado tres especies de madera, cuya utilización es muy habitual en el ámbito de la construcción, tanto estructuralmente como para elementos de revestimiento y acabado: el pino silvestre, el pino laricio y el haya. Por otro lado se han seleccionado los productos con los que realizar la impregnación: sulfato de magnesio hidratado (Epsomita) y borato de sodio hidratado (Neobor).

Una vez preparadas las soluciones, se lleva a cabo la impregnación de la madera mediante la realización de vacío en un autoclave y posteriormente se analiza la cantidad de solución impregnada y su homogeneidad dentro de la madera utilizando el microscopio electrónico de barrido (SEM).

Finalmente, se realizan los ensayos de caracterización térmica y comportamiento frente al fuego y se comparan los resultados obtenidos, en función de los productos y las especies de madera utilizados, con el fin de obtener las conclusiones respecto a la mejora que supone el tratamiento realizado en cuanto a la reacción de la madera en caso de incendio.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este proyecto experimental, se ha podido llegar a la conclusión de que la impregnación, tanto con Epsomita como con Neobor, mejora el comportamiento de las maderas frente al fuego. Destacando que las muestras impregnadas con Epsomita presentan una mayor cantidad de producto en su interior y que el pino laricio presenta mejores resultados tanto en cantidad de producto impregnado como en los ensayos de comportamiento frente al fuego.

ÍNDICE

1. GLOSARIO	5
2. INTRODUCCIÓN	7
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA	9
3.2. ESPECIES DE MADERAS	17
3.3. HUMEDAD Y SECADO DE LA MADERA	24
3.4. COMPORTAMIENTO DE LA MADERA FRENTE AL FUEGO	25
3.4.1. CLASIFICACIÓN DE REACCIÓN Y RESISTENCIA AL FUEGO	26
3.5. LA IGNIFUGACIÓN DE LA MADERA	29
3.5.1. SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONTRA EL FUEGO	29
3.5.2. CLASIFICACIÓN DE IGNIFUGANTES	31
3.6. PRODUCTOS PROTECTORES	32
3.6.1. SULFATO DE MAGNESIO	33
3.6.2. BORATO DE SODIO	34
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	37
4.1. MATERIALES	37
4.1.1. MUESTRAS DE MADERA	37
4.1.2. SOLUCIONES A IMPREGNAR	38
4.2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y SECADO DE LA MADERA	40
4.3. IMPREGNACIÓN	42
4.3.1. AUTOCLAVE	42
4.3.2. IMPREGNACIÓN DE LAS MUESTRAS	43
4.4. EVALUACIÓN DE LA IMPREGNACIÓN	46
4.4.1. ANÁLISIS CUANTITATIVO	46

4.4.2.	ANÁLISIS CUALITATIVO	47
4.5.	ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO AL FUEGO	58
4.5.1.	ENSAYO DE GOTEO	58
4.5.2.	ENSAYO CON BUNSEN	60
4.5.3.	ENSAYO DE ÍNDICE DE OXÍGENO (L.O.I.)	62
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
5.1.	ENSAYO DE GOTEO	65
5.2.	ENSAYO CON BUNSEN	69
5.3.	ENSAYO DE ÍNDICE DE OXÍGENO (L.O.I.)	74
6.	CONCLUSIONES	77
7.	BIBLIOGRAFIA	79
8.	AGRADECIMIENTOS	83
9.	ANEXOS	85

1. GLOSARIO

Comportamiento al fuego: conjunto de las transformaciones físicas y químicas de un material o de un elemento de construcción sometido a la acción destructiva del fuego.

Ignifugación: aplicación de un tratamiento a un material haciendo uso de sustancias ignífugas.

Ignífugo: sustancia que tiene la cualidad de suprimir, disminuir o retardar la combustión de ciertos materiales.

Carbonizar: reducir a carbón, más o menos puro, un cuerpo orgánico por la acción de una combustión incompleta.

Combustión: reacción exotérmica de una sustancia, llamada combustible, con un oxidante, llamado comburente; el fenómeno viene acompañado generalmente por una emisión lumínica en forma de llamas o incandescencia con desprendimiento de productos volátiles y/o humos, y que puede dejar un residuo de cenizas.

Ignición: inicio de una combustión.

Extinción: fin de una combustión.

Combustible: sustancia susceptible de arder.

Incombustible: sustancia no susceptible de arder.

CTE: Código Técnico de la Edificación.

Epsomita: sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Neobor: borato de sodio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

H: Humedad, %.

L.O.I.: ensayo de Índice de Oxígeno.

EDS: Energy Dispersive Spectrometer.

Dual BSD: detector de electrones retrodispersados.

LFD: Large Field Detector.

2. INTRODUCCIÓN

El proyecto realizado surge de la propuesta que me plantean los profesores Laia Haurie y Joaquín Montón, desde la Sección de Materiales de la EPSEB, en colaboración con la Facultad de Química de la Universidad de Barcelona. La idea es llevar a cabo un estudio experimental sobre la mejora del comportamiento de la madera frente al fuego utilizando un nuevo y prometedor producto, en este campo, para llevar a cabo la impregnación, la Epsomita, y compararlo con otro producto que suele utilizarse para esta tarea, el Neobor.

La madera es uno de los recursos naturales más utilizados en el ámbito de la construcción en todos los periodos de la historia, debido a sus excelentes propiedades físicas y mecánicas y también, por su alto valor decorativo. La madera es accesible y puede ser elaborada y transformada utilizando sistemas de herramientas poco complejas.

Uno de los principales problemas de la madera, en el ámbito de la construcción, es que es un material combustible. Utilizada en elementos no estructurales (suelos, revestimientos de paredes y techos, muebles, etc.), su comportamiento al fuego es un tema importante a tener en cuenta debido a su posible contribución en la propagación de un incendio. En elementos estructurales, la madera también puede contribuir a dicha propagación, pero en este caso la preocupación es que el elemento resista un tiempo determinado.

El objetivo principal de este estudio es analizar los posibles beneficios aportados en diferentes especies de madera por la impregnación con los dos productos mencionados anteriormente. Además, se valorarán las ventajas aportadas por la utilización de un autoclave para llevar a cabo la impregnación de madera, ya que este sistema no se había utilizado en estudios similares realizados anteriormente desde la EPSEB.

Otro punto de interés es la valoración de la Epsomita como un nuevo producto ignífugo, analizando el nivel de penetración en las muestras de madera y su eficacia en la mejora de la reacción de la madera frente al fuego reduciendo su inflamabilidad, ayudando a la extinción de la llama o retardando su aparición.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

La madera es un material complejo con unas características y propiedades que dependen tanto de su composición como de su constitución.

La madera es un material heterogéneo que está formado por diferentes tipos de células especializadas que forman los tejidos. Estos tejidos llevan a cabo las funciones fundamentales del árbol: conducción de la savia, transformación y almacenamiento de los alimentos y formación de la estructura resistente o portante del árbol.

El tamaño, forma y distribución de los tejidos, junto con otros elementos anatómicos, como los radios leñosos, la presencia de canales resiníferos o de vasos, etc. son los que dan lugar o definen las diferentes especies de madera.

Composición de la madera

La madera es una sustancia fibrosa y organizada, esencialmente heterogénea, producida por un organismo vivo, que es el árbol. Sus propiedades y posibilidades de utilización son la consecuencia del carácter, la organización y la composición química de las células que la constituyen. Su origen vegetal hace que sea un material con unas características peculiares que lo diferencian de otros de origen mineral.

Compuestos orgánicos de la madera:

- Celulosa (40-50%)
- Lignina (25-30%)
- Hemicelulosa (20-25%)
- Resina, tanino, grasas (porcentaje restante)

Estos compuestos contienen:

- Elementos esenciales (90%):
 - Carbono (46-50%)
 - Oxígeno (38-42%)
 - Hidrógeno (6%)
 - Nitrógeno (1%)
- Otros elementos (10%)
 - Fósforo, azufre, potasio, calcio, sodio
 - Compuestos inorgánicos
 - Agua

Constitución de la madera

La estructura macroscópica de la madera es la que se estudia a simple vista o con lupa de diez aumentos.

Como se observa en la figura 3.1, la sección del tronco tiene forma circular y está formada por sucesivas capas que se llaman anillos. Entre la madera y la corteza hay una capa generatriz, denominada cambium, que produce xilema hacia el interior y floema hacia el exterior.

En cada periodo vegetativo se forma un nuevo anillo que cubre el anterior y en el que se diferencian dos zonas, la madera de primavera y la madera de verano. Esto hace distinguible, en la sección transversal, una serie de anillos concéntricos, denominados anillos de crecimiento. Cada anillo corresponde a un periodo vegetativo de la vida del árbol y que en nuestro clima representa el crecimiento anual, por tanto el número de anillos representa la edad del árbol.

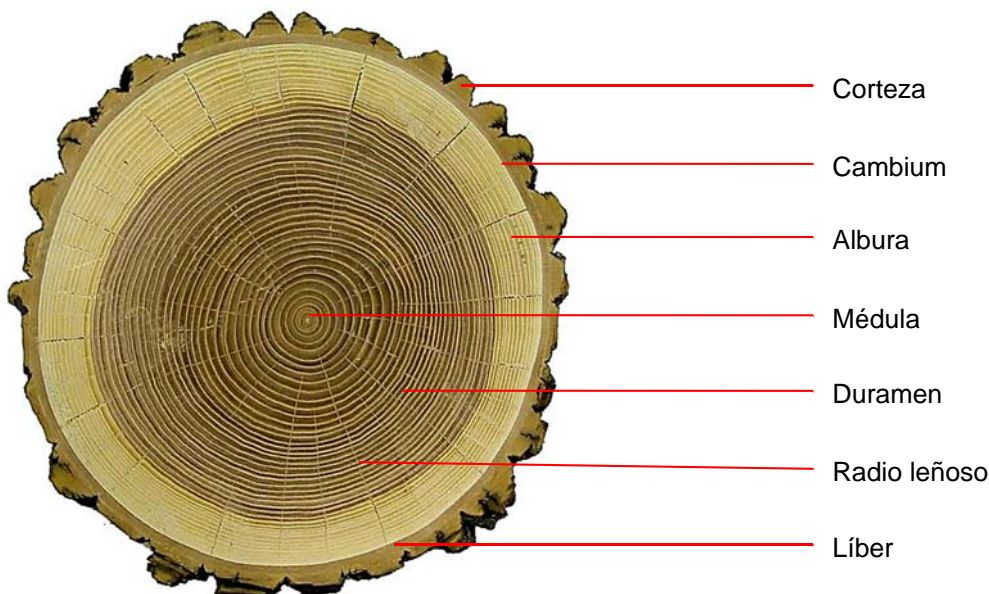


Figura 3.1. Sección de un tronco

Médula: es la parte central del árbol. Tiene un diámetro muy pequeño y está constituida por un tejido flojo y poroso. Se trata de madera vieja y normalmente agrietada, que no se utiliza en el proceso de elaboración de la madera.

Duramen: es la madera de la parte interna del tronco. Constituido por tejidos que han llegado a su desarrollo y resistencia máximos. Suele tener coloración más oscura que la

albura y más resistencia respecto a los ataques bióticos. Es aprovechable en el proceso de elaboración de la madera.

Albura: es la madera de la parte externa del tronco, bajo la corteza. Constituida por tejidos jóvenes en proceso de crecimiento. Es de coloración más clara que el duramen, más porosa y ligera y con más riesgo respecto a los ataques bióticos, ya que contiene mucha savia y materias orgánicas.

Cambium: es la capa existente entre la albura y la corteza. Constituye la base del crecimiento del tronco generando madera (albura) hacia el interior y liber hacia el exterior.

Líber: es la parte interna de la corteza. Filamentosa y poco resistente.

Corteza: Es la parte exterior del tronco, formada por un tejido impermeable que recubre el liber y protege el árbol.

Radios leñosos: son bandas estrechas de un tejido con células que se desarrollan en dirección radial (perpendicular a los anillos de crecimiento). Almacenan y distribuyen las materias nutritivas de la savia descendente. Contribuyen a que la deformación en dirección radial sea más pequeña respecto a la dirección tangencial, pero son las zonas de ruptura a compresión cuando se ejerce el esfuerzo en dirección paralela a las fibras.

La estructura microscópica de la madera no puede estudiarse a simple vista, se deber recurrir al uso del microscopio. Se puede considerar la madera como un conjunto de células alargadas en forma de tubos paralelos al eje del árbol, muy variables tanto en longitud y forma, como en grueso de paredes y dimensiones interiores. Estas células están unidas entre sí por materia intercelular y también por otro tipo de células colocadas en sentido radial del tronco, que forman los radios leñosos. Las paredes de las células están formadas por una serie de capas compuestas, principalmente, por microfibras de celulosa embebidas en un material amorfo e insoluble, la lignina. Todo esto hace de la madera un material resistente y ligero que puede competir favorablemente con otros materiales utilizados en la construcción, en lo que se refiere a la relación resistencia-peso específico.

La variedad de tipos de células y la forma de unirse entre ellas definen la infinidad de especies diferentes de madera que existen.

Tanto en la madera de coníferas como en la de frondosas existen dos tipos de tejidos: los prosenquitomatosos, que tienen como función principal la de ser tejidos de resistencia y de conducción, y los parenquimatosos, que son tejidos de almacenamiento y de conducción.

Las diferencias principales que existen entre la madera de coníferas y la de frondosas, en cuanto a su estructura microscópica, son las siguientes:

- Las frondosas tienen vasos, mientras que las coníferas carecen de ellos.
- Las coníferas poseen radios leñosos uniseriados y las frondosas multiseriados.
- La estructura de las frondosas es mucho más compleja.
- Las frondosas son más ricas en parénquima que las coníferas.

Elementos anatómicos de la madera de coníferas

Traqueidas. Tienen como función principal la de ser tejidos de resistencia y de conducción. Son el elemento más abundante. Tienen forma de prisma rectangular alargado y punteaduras areoladas, generalmente uniseriadas. Se distinguen dos tipos, las traqueidas normarles y las traqueidas en cadena, que son más cortas y sus punteaduras más pequeñas.

Radios leñosos. Se dan únicamente en sentido transversal. Están compuestos por traqueidas radiales, parénquima y, en algunos casos, canales resiníferos. Dependiendo de si están constituidos por uno, dos o los tres elementos, se denominan homogéneos, heterogéneos o fusiformes, respectivamente. En las coníferas, todos los radios que no contienen canales resiníferos son uniseriados, puesto que están constituidos por una sola línea de células.

Células de parénquima. Son tejidos de almacenamiento y de conducción. Son más abundantes en sentido transversal que en el longitudinal. Son células rectangulares con paredes más delgadas que las de las traqueidas y con punteaduras de paso entre las células de parénquima radial y las traqueidas verticales, que se definen como campo de cruce.

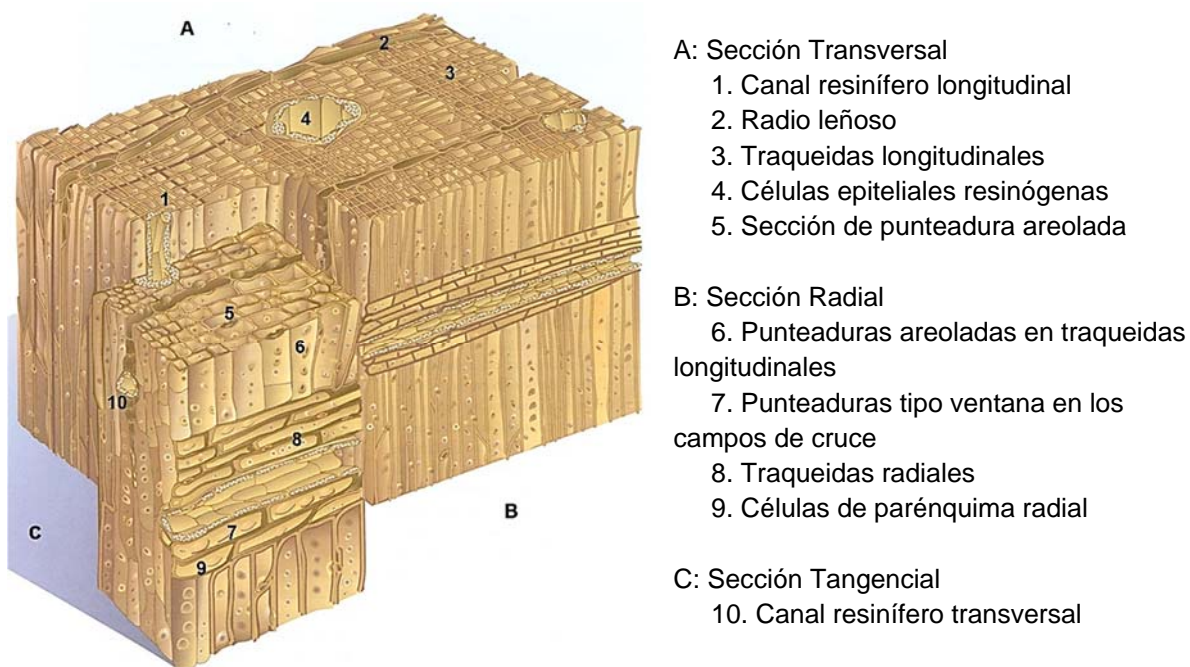


Figura 3.2. Estructura microscópica de la madera de coníferas

Elementos anatómicos de la madera de frondosas

Vasos o elementos vasculares. Es la característica principal que distingue a la maderas de frondosas. Tienen forma cilíndrica, de diámetro muy superior al resto de elementos y su función es la conducción de agua y savia. Se dan únicamente en sentido longitudinal. Se clasifican según su distribución: aislados, múltiples radiales o agrupados.

Tejido fibroso. Formado por células alargadas. Constituye el elemento de sostén, por lo que su función principal es de resistencia mecánica.

Células de parénquima. Son abundantes en sentido transversal y en el longitudinal. Existen dos tipos, fusiforme, con los extremos de sus células en forma de huso y en filas, o septado, con paredes terminales transversales.

Radios leñosos. Se dan únicamente en sentido transversal. Están compuestos por células de parénquima de dos tipos: procumbentes y erectas. En función de si están compuestos de un tipo de célula o de los dos tipos, se clasifican como homogéneos o heterogéneos respectivamente. Pueden ser uniseriados o multiseriado.

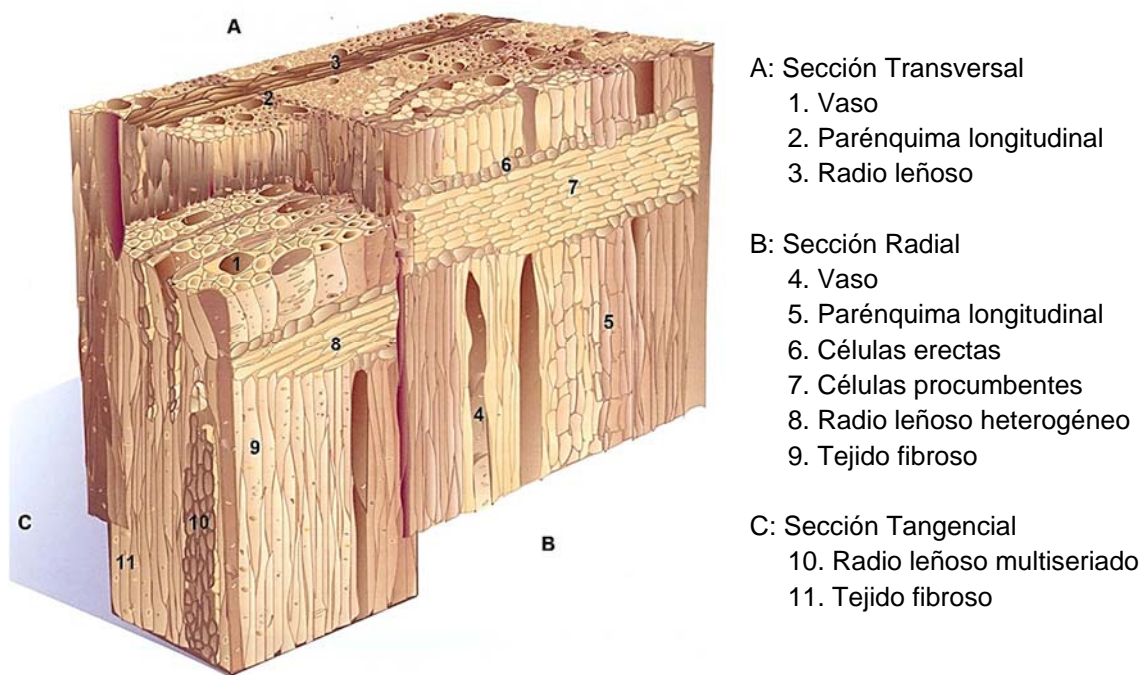


Figura 3.3. Estructura microscópica de la madera de frondosas

Propiedades físicas de la madera

En cuanto a las propiedades físicas de la madera, cabe destacar las que ha sido necesario tener en cuenta en el desarrollo de este estudio y que influyen sobre el resto de propiedades:

Anisotropía: la madera es un material heterogéneo, esto se refleja en sus propiedades físicas y mecánicas, y es la causa de algunas de sus ventajas e inconvenientes. La anisotropía es el diferente comportamiento de sus las propiedades físicas y mecánicas según la dirección que se considere. Tal y como se muestra en la figura 3.4, se establecen tres planos o direcciones principales: Longitudinal, Radial, Tangencial.

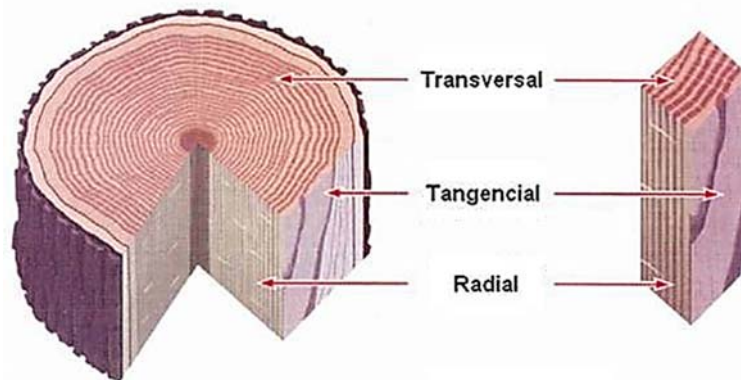


Figura 3.4. Direcciones principales de la madera

Higroscopicidad: la madera es un material higroscópico que tiende a absorber o perder agua según las condiciones del ambiente (humedad relativa y temperatura del aire). De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado humedad de equilibrio higroscópico (HEH) y, por tanto, será necesario secarla previamente hasta lo más próximo esta humedad, para que sufra las mínimas alteraciones dimensionales posibles. La madera deberá tener la humedad correspondiente a la humedad de equilibrio higroscópico de las condiciones higrotérmicas de servicio. De esta manera se reducen los movimientos que podrían ocasionarse a causa de la variación de su grado de humedad. La higroscopicidad de la madera se mide como la variación de la densidad de la misma cuando su contenido de humedad varía en un 1 por 100.

Propiedades mecánicas de la madera

Debido a la anisotropía de su estructura, a la hora de definir sus propiedades mecánicas se consideran la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. En este hecho radica la principal diferencia de comportamiento frente a otros materiales utilizados estructuralmente, como el acero y el hormigón. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

Sus propiedades mecánicas son:

- Muy elevada resistencia a la flexión, comparada con su peso.
- Buena capacidad de resistencia a la tracción y a la compresión paralelas a la fibra.

- Baja resistencia al cortante.
- Muy baja resistencias a la compresión y a la tracción perpendiculares a las fibras.
Sobre todo en tracción.
- Bajo módulo de elasticidad.

Propiedades tecnológicas

Estas propiedades recogen información sobre los comportamientos o aptitudes de la madera relativas a aspectos tecnológicos de sus procesos de transformación. Los procesos más habituales a los que se somete la madera son los siguientes:

- *Secado*: cédulas de secado tipo.
- *Aserrado*: despieces, facilidad o dificultad de aserrado, equipos y tipo de sierras.
- *Chapa por desenrollo y corte a la plana*: aptitud para obtener chapas de madera y sin necesidad de realizar tratamientos de cocido o vaporizado.
- *Mecanizado*: facilidad o dificultad, equipos.
- *Encolado*: dificultad o problemas que se presentan, preparación superficies, tipos de colas.
- *Clavado y atornillado*: facilidad o necesidad de realizar taladros previos.
- *Acabado*: aptitud productos decorativos, como pinturas, barnices, tintes, lacas, etc.
Facilidad o necesidad de preparar previamente las superficies.

Peculiaridades o defectos de la madera

Se denominan defectos a los factores principales que pueden alterar el comportamiento y las propiedades mecánicas de la fusta y que son causados por su propia constitución. Son los siguientes:

- Holgura de los anillos
- Nudos
- Bolsas de resina
- Fendas y acebolladuras
- Desviación de las fibras
- Gemas

Aplicaciones de la madera

Con el objeto de ordenar las maderas según sus aplicaciones en construcción se ha definido el concepto de "Grupos tecnológicos", que recogen dichas aplicaciones y las propiedades que ha de tener la madera.

Chapas para recubrimientos decorativos

- veteado y color atractivo.

- madera blanda o semidura.
- facilidad de encolado.
- aptitud para el desenrollo y chapa a la plana.

Tableros contrachapados estructurales

- madera blanda o semidura.
- trozas cilíndricas y de gran diámetro.
- facilidad de encolado.
- resistencia mecánica de la madera.
- no presentar alabeos ni fendas superficiales.
- densidad inferior a 800 kg/m³.
- aptitud para el desenrollo.

Carpintería exterior (ventanas, mobiliario exterior, revestimiento exterior, pérgolas, etc.)

- coeficientes de contracción pequeños.
- coeficientes de contracción radial y tangencial próximos.
- fibra recta.
- densidad y dureza media.
- resistencias mecánicas medias-grandes.
- durabilidad natural o facilidad de impregnación.

Carpintería interior (revestimientos interiores, frisos, puertas, escaleras, suelos de madera, etc.

- Las exigencias son parecidas a las de la carpintería exterior pero, además, pueden utilizarse maderas de densidad algo más bajo y la resistencia a la intemperie pasa a un segundo plano.
- molduras y rodapiés: maderas blandas, fibra recta, fácil de trabajar, acabado fácil, contracción baja.
- suelos: contracción de baja a mediana, resistencia a la abrasión y productos domésticos, dureza, densidad, fibra recta, grano fino, fácil de, facilidad de acabado (lijado, encerado, barnizado, etc.), en el caso de los suelos de tarima facilidad de clavado, para los suelos de madera especiales se exige una gran dureza y resistencia a la abrasión.

Mobiliario y ebanistería.

- buenas características de acabado.
- bajo coeficiente de contracción.
- coeficientes de contracción radial y tangencial próximos.
- apariencia, color, veteados y figuras atractivos.
- buenas características de acabado.
- fácil de trabajar.

- facilidad de encolado
- facilidad de curvado.
- resistencia al arranque de tornillos
- resistencia a la raja y a la hienda

Carpintería de armar.

- resistencias y módulo de elasticidad elevados.
- durabilidad natural frente a los insectos y hongos xilófagos o facilidad de impregnación en situaciones de riesgo.
- facilidad de trabajar en carpintería ensamblada.
- fácil de clavar y de encolar.
- fibra recta.

Estructuras de madera laminada.

- resistencias y módulo de elasticidad elevados.
- facilidad para el encolado.
- durabilidad natural o impregnabilidad en el caso de estructuras situadas al exterior.
- densidad no muy elevada.

3.2. ESPECIES DE MADERAS


En el mundo existen más de 16.000 especies de maderas, de las cuales sólo tienen carácter comercial unas 2.000 y de éstas se comercializan habitualmente, unas 400. Muchas de estas especies solamente se utilizan en sus países de origen y son prácticamente desconocidas en el resto del mundo.

Para realizar este estudio hemos seleccionado tres especies de madera que son muy habituales en España, tanto en su producción y comercialización como en su aplicación en la construcción.


A continuación, se exponen las fichas de propiedades y características de cada especie de madera. La información de estas fichas se ha extraído del libro: *Especies de maderas*, de AITIM.

PINO SILVESTRE			
Nombre botánico	Pinus Sylvestris		
Taxonomía botánica	Conífera		
Familia	Pinaceae		
Nombre comercial		Nombres vernáculos	
<ul style="list-style-type: none">- Español: Pino Silvestre, Pino Flandes, Pino Norte, Pino Nórdico, Pino Suecia, Pino Ruso- Inglés: Redwood, Scots Pine, Pine- Francés: Pin commun, Pin Sylvestre, Pin Blanc, Pin Rouge, Pin Sauvage- Italiano: Pino Silvestre- Portugués: Pinheiro Silvestre- Alemán: Föhre Weiss, Gemeine kiefer, Wald kiefer		<ul style="list-style-type: none">- Sierra de Gredos: Pino Serrano- Cuenca, Soria y Burgos: Pino albar, Pino Soria- Guadarrama occidental: Pino albar, Pino Soria- Valsaín: Pino Valsaín- Pirineo Aragonés: Pino rojo- Levante y Aragón: Pi rojal- Cataluña: Pi blancal, Pi bord, Pi rodal	
Procedencia y disponibilidad			
<p>Se encuentra ampliamente distribuido en el norte de Asia y en Europa (España, Escocia, Noruega, Suecia, Finlandia, Alpes marítimos en Francia y Rusia).</p> <p>En España existen grandes masas en los Pirineos, Cordillera Ibérica y Cordillera Central. Las mayores producciones se dan en las comunidades de Castilla-León, Aragón y Cataluña. Sus masas forestales, su producción y su exportación son estables. Las principales fuentes de suministro a España son Suecia, Finlandia y Rusia.</p>			
Descripción de la madera			
<p>La madera de albura es de color amarillo pálido y el duramen es de color rojizo. La diferencia entre ambas zonas es más acusada en la sección transversal en la que se aprecian sus tonalidades diferentes. Los anillos de crecimiento están muy marcados en la madera de verano y tienen un espesor de 1,5 a 3 mm (madera procedente de España).</p>			
Estructura microscópica			
<p>Traqueidas de sección cuadrada con punteaduras areoladas en filas uniseriadas. Parénquima longitudinal ausente o escaso. Radios leñosos uniseriados y heterogéneos. Punteaduras de los campos de cruce de tipo ventana.</p>			
Propiedades físicas		Propiedades mecánicas	
Densidad:	500-520-540 kg/m³	Madera libre de defectos:	
Contracción:	Poco nerviosa	- Flexión estática:	90-110 N/mm²
Coeficientes de contracción: total (unitario)		- Módulo de elasticidad:	8.600-10.000 N/mm²
- volumétrica:	12,90% (0,34)	- Compresión axial:	42-47 N/mm²
- tangencial:	6,80% (0,21)	- Compresión perpend.:	9,2 N/mm²
- radial:	3,80% (0,12)	- Cortante	10-11 N/mm²
Dureza:	2,0 Semidura	- Flexión dinámica:	2,25 J/cm²
		Madera estructural:	

	Las calidades ME-1 y ME-2 de la norma UNE-56.544-2011 dan lugar a las clases resistentes C30 y C18, respectivamente.
Propiedades tecnológicas	
Secado	Seca al aire rápidamente y sin deterioro de su calidad, pero debido a su tendencia al azulado deberá tratarse con productos antiazulado. En el secado artificial el riesgo de azulado es menor.
Aserrado	Sin dificultad utilizando los equipos convencionales.
Chapa por desenrollo y corte a la plana	Buenas aptitudes para la obtención de chapas. Se recomienda realizar un vaporizado moderado (80º) para facilitar el corte de los nudos en el desenrollo.
Mecanizado	No suele presentar problemas. La facilidad de trabajo depende del tamaño y número de nudos y la cantidad de resina que tenga.
Cepillado y moldurado	Deben utilizarse lo útiles bien afilados, ya que es frecuente la aparición de una superficie ondulada debido a la variación de densidad de los crecimientos.
Encolado	Buenas aptitudes con cualquier tipo de cola. Se recomienda encolar las superficies recién cepilladas.
Clavado y atornillado	Sin dificultad. Presenta altas resistencias al arranque.
Acabado:	No presenta problemas. Admite pinturas, barnices y tientes.
Durabilidad natural e impregnabilidad	
La madera está clasificada como poco durable, con gran diversidad de comportamiento, frente a los hongos xilófagos, y sensible a los anóbidos, cerambícidos y termitas. La madera de albura es impregnable y la de duramen no es impregnable.	
Aplicaciones	
<ul style="list-style-type: none"> - Chapas para recubrimientos decorativos - Tableros contrachapados estructurales - Tableros contrachapados decorativos - Carpintería interior: puertas, escaleras, suelos, tarima, molduras, rodapiés, revestimientos, frisos - Carpintería exterior - Mobiliario y ebanistería - Carpintería de armar - Madera laminada encolada - Postes - Cercas 	

PINO LARICIO		
Nombre botánico	Pinus Nigra	
Taxonomía botánica	Conífera	
Familia	Pinaceae	
Nombre comercial		Nombres vernáculos
<ul style="list-style-type: none"> - Español: Pino laricio - Inglés: Austrian pine, Corsican pine - Francés: Pin noir d'Autriche, Pin laricio de Corse - Italiano: Pino nero dell'Austria, Pino laricio, Pino di corso, Pino silano - Alemán: Österreichische, Schwarzkiefer, Korsische kiefer 		<ul style="list-style-type: none"> - Andalucía: Pino salgareño - Cuenca, Teruel, Guadalajara, Castellón: Pino negral - Ávila: Pino cascalbo - Soria, Burgos: Pino ampudio - Huesca: Pino albar, Pino blanco, Pino Nasarre, Pino nazarrón - Cataluña: Pi gragalla, Pi sarrut, Pi nassa, Pi bord
Procedencia y disponibilidad		
<p>Se encuentra en el sur y en el centro de Europa y se ha introducido su cultivo en el Reino Unido.</p> <p>Sus masas forestales, su producción y su exportación son estables.</p>		
Descripción de la madera		
<p>El color de la madera de albura es blanco amarillento y el del duramen es rojo pálido. La madera de albura está claramente diferenciada. Los anillos de crecimiento son visibles. Presenta numerosas vetas en las caras radiales y tangenciales semejantes a las del pino silvestre, pero con un color un poco más oscuro.</p> <p>La fibra es recta. El grano varía de fino a medio.</p> <p>Tiene un fuerte olor a resina. Presenta numerosos canales resiníferos, principalmente en la zona de paso entre la madera de primavera y la de verano, que la convierten en una madera muy resinosa</p>		
Estructura microscópica		
<p>Traqueidas de sección cuadrada con punteaduras areoladas en filas uniseriadas. Parénquima longitudinal ausente o escaso. Radios leñosos fusiformes, uniseriados y pluriseriados debido a la presencia de canales resiníferos. Punteaduras de los campos de cruce de tipo ventana.</p>		
Propiedades físicas		Propiedades mecánicas
<p>Densidad: 510-580-650 kg/m³</p> <p>Contracción: Poco nerviosa</p> <p>Coeficientes de contracción: total (unitario)</p> <ul style="list-style-type: none"> - volumétrica: 11,8% (0,34) - tangencial: 6,61% (0,25-0,31) - radial: 3,24% (0,14-0,17) <p>Dureza: 2,2 Semidura</p>		<p>Madera libre de defectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Flexión estática: 92-116 N/mm² - Módulo de elasticidad: 9.500-10.143 N/mm² - Compresión axial: 45 N/mm² - Compresión perpend.: 9 N/mm² - Cortante: - - Flexión dinámica: 2,45 J/cm² <p>Madera estructural:</p>

		Las calidades ME-1 y ME-2 de la norma UNE-56.544-2011 dan lugar a las clases resistentes C35 y C22 respectivamente
Propiedades tecnológicas		
Secado	La velocidad de secado es lenta. En el secado al aire presenta riesgos de que se azulee. En el secado artificial no presenta riesgos de que se produzcan deformaciones, pero sí presenta riesgos de que aparezcan fendas alrededor de los nudos y de que exude resina.	
Aserrado	Sin dificultad utilizando los equipos convencionales	
Chapa por desenrollo y corte a la plana	No se realiza habitualmente. En el corte a la plana se requieren troncos de grandes diámetros y en el desenrollo se recomienda utilizar árboles poco resinosos y realizar un vaporizado previo.	
Mecanizado	Se realiza fácilmente. Los nudos son adherentes y no muy duros y la resina puede embotar los útiles y provocar un calentamiento excesivo.	
Encolado	No presenta problemas. Se recomienda utilizar colas alcalinas o colas de resorcina. Se recomienda encolar las superficies recién cepilladas.	
Clavado y atornillado	Sin dificultad. Presenta altas resistencias al arranque.	
Acabado:	No presenta problemas. Se recomienda aplicar los productos de acabado sobre las superficies recién cepilladas.	
Durabilidad natural e impregnabilidad		
La madera está clasificada como poco durable, con un grado inusual de variabilidad, frente a los hongos xilófagos, y sensible a los anóbidos, cerambícidos y termitas. La madera de albura es impregnable y la de duramen no es impregnable.		
Aplicaciones		
<ul style="list-style-type: none">- Chapas para recubrimientos decorativos- Carpintería interior: suelos- Carpintería exterior: puertas, ventanas, persianas, balcones- Carpintería de armar- Madera laminada encolada- Pasarelas- Puentes		

HAYA EUROPEA		
Nombre botánico	Fagus sylvatica	
Taxonomía botánica	Frondosa	
Familia	Fagaceae	
Nombre comercial		Nombres vernáculos
<ul style="list-style-type: none"> - Español: Haya - Inglés: European beech, Common beech - Francés: Hêtre commun, Fau, Fayard, Fay, Feuteau - Italiano: Faggio - Alemán: Gemeine Buche, Retbuche 		<ul style="list-style-type: none"> - Navarra: Bacua - Huesca: Fage - Cataluña: Faix, Fatg - Aragón: Hay - Asturias: Faya - País Vasco: Paga, Pago, Paya
Procedencia y disponibilidad		
Es una especie europea, que domina mucho más en el occidente que en el oriente. En España las masas más importantes se encuentran en Navarra, en los montes de Irati y Valle de Salazar y algo en Asturias. Sus masas forestales son estables, su producción y exportación son importantes.		
Descripción de la madera		
<p>La madera de albura no se diferencia del duramen. Su color varía de un blanco anaranjado a un rosado más o menos intenso. Los radios leñosos son visibles a simple vista en la sección tangencial y están distribuidos irregularmente en cortas líneas fusiformes. Los anillos de crecimiento están regularmente diferenciados, la zona de primavera es mucho más ancha y de color más claro que la de verano.</p> <p>La fibra es recta, aunque en los árboles muy gruesos pueden presentarse fibras ligeramente torcidas. El grano es fino.</p>		
Estructura microscópica		
Vasos en distribución difusa, se presentan aislados, agrupados o en alineación múltiple. Células de parénquima septadas. Radios leñosos heterogéneos y multiseriados.		
Propiedades físicas		Propiedades mecánicas
Densidad: 690-710-750 kg/m ³ Contracción: Medianamente nerviosa-Nerviosa Coeficientes de contracción: total (unitario) - volumétrica: 18,6-24,6% (0,45-0,62) - tangencial: 12,0-15,0% (0,26-0,50) - radial: 5,0-8,0% (0,12-0,30) Dureza: 4,0 Semidura		Madera libre de defectos: - Flexión estática: 90-166 N/mm ² - Módulo de elasticidad: 12.300-16.400N/mm ² - Compresión axial: 52-64 N/mm ² - Compresión perpend.: 12 N/mm ² - Cortante: 7,7-10 N/mm ² - Flexión dinámica: 4,4-8,8-12,0 J/cm ²
Propiedades tecnológicas		
Secado	Tendencia bastante fuerte a torcerse y a abrirse, con la consiguiente aparición de fendas. Se suele realizar un tratamiento de vaporizado, previo al secado, que libera parcialmente las tensiones internas.	

Aserrado	Presenta problemas debido al carácter nervioso de la madera
Chapa por desenrollo y corte a la plana	Buenas aptitudes para la obtención de chapas. Se puede desenrollar y cortar a la plana en estado verde hasta espesores de 15-20 décimas de milímetro.
Mecanizado	Sin dificultad. Buenas aptitudes para el torneado, escopleado, mortajado y taladro.
Cepillado y moldurado	Buenas aptitudes para el curvado, pero depende de la posición de la madera dentro del árbol. Se curva mejor la madera de la base y la de la periferia.
Encolado	No presenta problemas con ningún tipo de cola.
Clavado y atornillado	Se recomienda realizar taladros previos.
Acabado:	No presenta problemas. Admite pinturas, barnices y tientes.
Durabilidad natural e impregnabilidad	
La madera está clasificada como no durable frente a la acción de los hongos y sensible a los insectos, a las termitas y a los xilófagos marinos. Tanto la madera de duramen como la de albura son impregnables.	
Aplicaciones	
<ul style="list-style-type: none"> - Chapas para recubrimientos decorativos - Carpintería interior: molduras - Mobiliario y ebanistería: muebles curvados 	

3.3. HUMEDAD Y SECADO DE LA MADERA

El secado de la madera consiste en reducir la humedad de la misma hasta un valor compatible con el uso previsto. Para conseguirlo lo más rápido posible es necesario:

- Suministrar el calor necesario para producir la evaporación del agua.
- Provocar el desplazamiento de la humedad desde el interior hasta la superficie de la pieza.
- Arrastrar de la superficie de la pieza el vapor de agua resultante de la evaporación.

Las diferencias en la estructura anatómica de las distintas especies de madera influyen en el proceso de secado, ya que el movimiento del agua se realiza a través de sus células (fibras, traqueidas, canales resiníferos, etc.).

El agua está presente en la madera de dos formas distintas:

- *Agua libre*. Presente en forma líquida rellenando el interior de las cavidades celulares cuando la madera tiene un contenido de humedad superior al Punto de Saturación de las Fibras (aproximadamente 30%).
- *Agua de impregnación o saturación*. Está fijada en las paredes celulares.

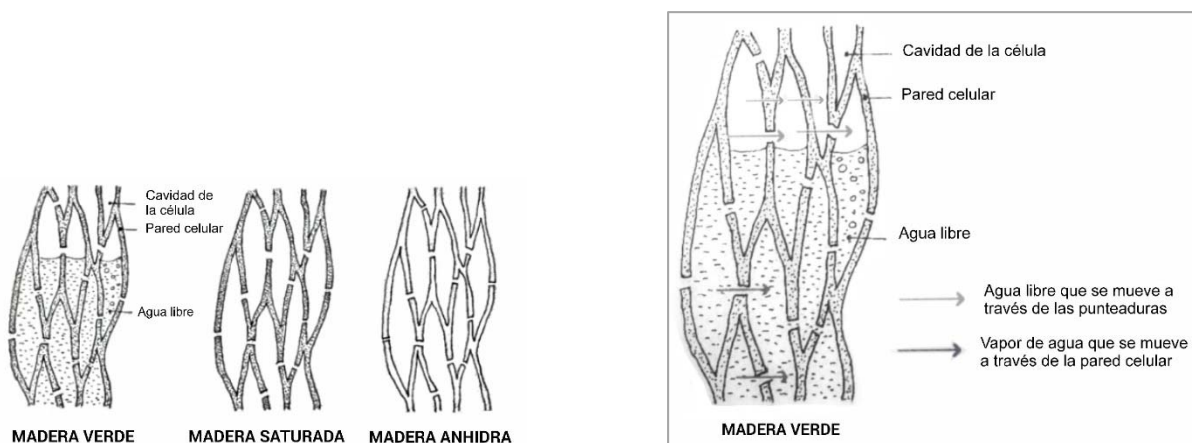


Figura 3.5. Formas de presentación del agua en la madera y esquema del movimiento del agua dentro de la madera.

El contenido de humedad de la madera se define como el cociente entre la masa de agua presente y la masa anhidra de la madera, expresado en tanto por ciento.

$$H(\%) = (M_h - M_o) / M_o \times 100$$

H: humedad de la madera (%)

M_h: masa de la madera húmeda

M_o: masa de la madera totalmente seca (anhidra)

Fórmula 3.1. Contenido de humedad de la madera.

La humedad de la madera no es homogénea en todo el espesor de la pieza, es menor en el duramen y mayor en la albura, debido a que el duramen es mucho más denso y con menos cantidad de poros que la albura. Además la humedad se estabiliza o varía según las condiciones del ambiente, como puede verse en la siguiente tabla.

Tabla 3.6. Humedad en diferentes estados de la madera.

Estado de la madera	Humedad (%)	Comentarios
Verde	>30	En pie o recién cortada
Saturada (PSF)	30	Expuesta al aire saturado
Semi-seca	23-30	Presecada u oreada
Comercializable seca (Shopping-dry)	18-22	Lista para el transporte. Humedad de equilibrio en transporte marítimo
Seca al aire	13-17	Seca al aire (humedad límite en secado al aire)
Seca en cámara	<13	Seca artificialmente (en cámara o secadero)
Anhidra	0	Secada en estufa (Laboratorio)

3.4. COMPORTAMIENTO DE LA MADERA FRENTE AL FUEGO

La madera es un material combustible y susceptible de ser degradada por el fuego, debido a que está compuesta fundamentalmente por carbono. La degradación por combustión puede provocar su total destrucción, dependiendo del tiempo de exposición al fuego.

Cuando la madera se expone a un foco de calor, su contenido de humedad disminuye en la zona directamente afectada al alcanzarse el punto de ebullición del agua. Si el aporte de calor se mantiene hasta llegar a una temperatura aproximada de 270°C, comienza el proceso denominado pirolisis de la madera, que consiste en el desprendimiento de gases susceptibles de arder. Si la madera no se somete a llama directa, no comenzará a arder hasta que no alcance los 400°C aproximadamente; en cambio, expuesta a llama directa, la ignición se produce en torno a los 300°C. Tras la combustión de la superficie se origina una capa exterior carbonizada, que protege el interior de la pieza retrasando el efecto del fuego.

La capacidad aislante de la capa carbonizada permite que el interior de la pieza se mantenga a una temperatura menor y que no se alteren sus propiedades físico-mecánicas. Por tanto, la pérdida de capacidad portante de un elemento de madera se debe, principalmente, a la reducción de su sección y no tanto al deterioro de las propiedades del material.

El comportamiento de la madera frente al fuego puede variar dependiendo de los siguientes factores:

- La relación entre la superficie y el volumen de la pieza. Las secciones estrechas y con aristas vivas tienen un comportamiento frente al fuego más desfavorable.
- La existencia de fendas. Incrementan los efectos del fuego.
- La densidad de la madera. Si la densidad es alta, comienza a arder con menos facilidad y la combustión es más lenta.
- El contenido de humedad. Cuanto mayor sea el contenido de humedad, más se retrasará el inicio de la combustión.

Muchos de los materiales que se utilizan en la construcción no son combustibles, sin embargo, ninguno es a prueba de fuego. Las estructuras metálicas se dilatan y retuercen, cuando están sometidas a altas temperaturas, produciendo el colapso del edificio al perder su resistencia. El hormigón armado se resquebraja con el calor y más aún cuando se somete a cambios bruscos de temperatura, como cuando se enfría rápidamente al ser mojado por el agua de las mangueras de los bomberos.

Comparando la madera con estos materiales de la construcción, podríamos afirmar que, a pesar de ser un material inflamable a temperaturas relativamente bajas, su baja conductividad térmica, la carbonización superficial y su despreciable dilatación térmica, hacen que se considere un material muy seguro.

3.4.1. CLASIFICACIÓN DE REACCIÓN Y RESISTENCIA AL FUEGO

La acción del fuego sobre la madera se evalúa con dos conceptos básicos que hacen referencia a los materiales individuales (reacción al fuego) y a los elementos estructurales (resistencia al fuego).

La reacción al fuego es el alimento que un material puede aportar al fuego y al desarrollo del incendio. Es un índice de la capacidad del material para favorecer el desarrollo del incendio.

En definitiva evalúa cómo se comporta un material frente al fuego para determinar si el material es combustible o incombustible.

La resistencia al fuego es el tiempo durante el cual, un elemento constructivo, es capaz de cumplir la función para la cual ha sido diseñado y colocado en el edificio.

La Directiva Europea sobre los Productos de la Construcción, dentro del requisito esencial de la Seguridad en Caso de Incendio, clasifica las propiedades de reacción y resistencia al fuego de los productos de construcción y de los elementos constructivos, concretándolas con las siguientes normas armonizadas europeas:

UNE-EN 13501-1:2002. *"Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego".*

Las clases de reacción al fuego definidas son:

- A1:** No Combustible. Sin contribución en grado máximo al fuego
- A2:** No Combustible. Sin contribución en grado menor al fuego
- B:** Combustible. Contribución muy limitada al fuego
- C:** Combustible. Contribución limitada al fuego
- D:** Combustible. Contribución media al fuego
- E:** Combustible. Contribución alta al fuego
- F:** Sin clasificar

Además se deben determinar y cuantificar mediante ensayo:

- *opacidad de los humos, s* (smoke) con denominación **s1, s2, s3**, para baja, media o alta opacidad de humos (incorpora los conceptos de velocidad de propagación y producción total de humos).
- *caída de gotas o partículas inflamadas, d* (drop) con denominación **d0, d1, d2**, para nula, media o alta caída de gotas o partículas inflamadas.

La clasificación no sólo depende del comportamiento ante el fuego de los materiales, sino también de la forma en que éstos se colocan sobre los soportes ya que los ensayos de un mismo material sobre diferentes aplicaciones finales pueden dar distintas clasificaciones.

Los materiales deben clasificarse según su aplicación final. La clasificación de los materiales para paredes y techos irán sin subíndice, para los suelos llevarán el subíndice **FL** (floor) y la de los productos lineales para aislamientos de tuberías llevarán el subíndice **L** (line).

UNE-EN 13501-2:2002. *"Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2: Clasificación a partir de datos obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego excluidas las instalaciones de ventilación"*

Las principales clases de resistencia al fuego definidas son:

R: Capacidad portante (*resistance*)

E: Integridad (*integrity*)

I: Aislamiento (*insulation*)

También se contemplan las siguientes clasificaciones para algunos casos concretos:

W: Radiación

M: Acción mecánica

C: Cierre automático

S: Estanquidad al paso de los humos

P o HP: Continuidad de la alimentación eléctrica o de la transmisión de la señal

G: Resistencia a la combustión de hollines

K: Capacidad de protección contra incendios

D: Duración de la estabilidad a temperatura constante

DH: Duración de la estabilidad considerando la curva normalizada tiempo-temperatura

F: Funcionalidad de los extractores mecánicos de humo y calor

B: Funcionalidad de los extractores pasivos de humo y calor

La escala de tiempo normalizada según esta norma UNE es **15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 y 240** minutos.

Las clases se indican de la siguiente forma:

R (t): tiempo que se cumple la estabilidad al fuego o capacidad portante.

RE (t): tiempo que se cumple la estabilidad y la integridad al paso de las llamas y gases calientes.

REI (t): tiempo que se cumple la estabilidad, la integridad y el aislamiento térmico.

3.5. LA IGNIFUGACIÓN DE LA MADERA

La ignifugación tiene por objeto disminuir el nivel de combustibilidad e inflamabilidad de la madera mediante su tratamiento con productos químicos que provocan modificaciones en su proceso de combustión.

La madera y los productos derivados de la madera sin tratar tienen normalmente una clasificación de reacción al fuego D-s2,d0. Esto significa que se trata de un material combustible con una inflamabilidad y una contribución al fuego relativamente altas (D), que produce una cantidad moderada de humo cuando arde (s2) y que no desprende gotas o partículas inflamadas en una fase inicial del incendio (d0).

Esta clasificación no es suficiente en muchos casos para cumplir los requisitos del CTE mediante la aplicación del DB-SI, dependiendo de la situación del material en el edificio. Sin embargo, mediante la aplicación de tratamientos ignifugantes, se puede modificar favorablemente la reacción al fuego de la madera y, de manera indirecta, se puede incidir en el aumento del tiempo de resistencia al fuego de los elementos constructivos de madera.

Por otro lado, la aplicación de ignifugantes no evita la descomposición y carbonización de la madera. La mejora está asociada, como ya se ha comentado, a la reducción de la inflamabilidad y de la emisión de calor.

3.5.1. SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONTRA EL FUEGO

Se pueden distinguir dos tipos de tratamiento en función de dónde se colocan o de cómo se introducen los productos ignifugantes en la madera.

Tratamientos superficiales

Los productos se colocan sobre la superficie de la madera mediante diferentes técnicas, que hacen que penetre por capilaridad desde la superficie hacia el interior.

- *Pincelado*: el producto se aplica mediante brocha, pincel o rodillo.
- *Pulverización*: el protector se aplica con un pulverizador mecánico o manual y es más eficaz que el pincelado.
- *Inmersión breve*: se sumerge la madera en el producto durante un periodo entre 10 segundos y 10 minutos.
- *Inmersión prolongada*: se sumerge la madera en el producto durante un periodo mínimo de 10 minutos.

Tratamientos en profundidad

Los productos penetran y se fijan en el interior de la madera utilizando técnicas de vacío-presión en un autoclave. En función de los vacíos y presiones que se realizan y de sus tiempos de aplicación se clasifican en: sistema de célula llena, de célula vacía y doble vacío. Para realizar estos tratamientos se requiere que la madera tenga un contenido de humedad inferior al 28%.

Sistema de célula llena.

Su objetivo es conseguir la máxima retención del producto en la madera tratada y consta de las siguientes fases:

- Vacío inicial, para extraer parte del aire de la madera.
- Introducción del producto a presión, que ocupará el lugar del aire extraído.
- Vacío final, para regular la cantidad de producto introducida.

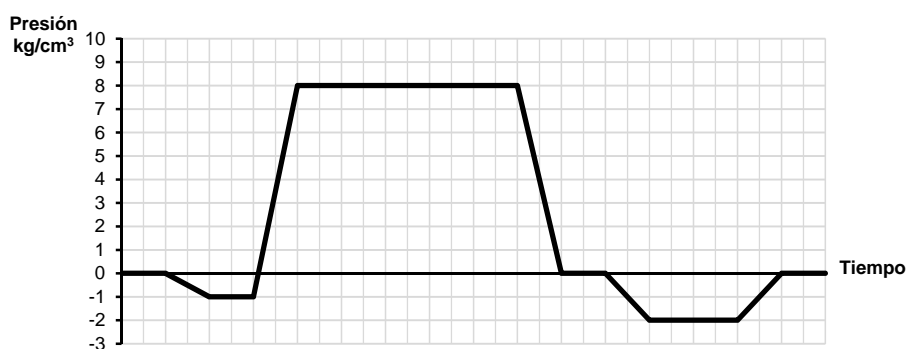


Figura 3.7. Sistema célula llena

Sistema de célula vacía.

Su objetivo es conseguir que el producto penetre profundamente en la madera y consta de las siguientes fases:

- La madera se somete a una presión superior a la atmosférica antes de la introducción del producto.
- Vacío final, para regular la cantidad de producto introducida.

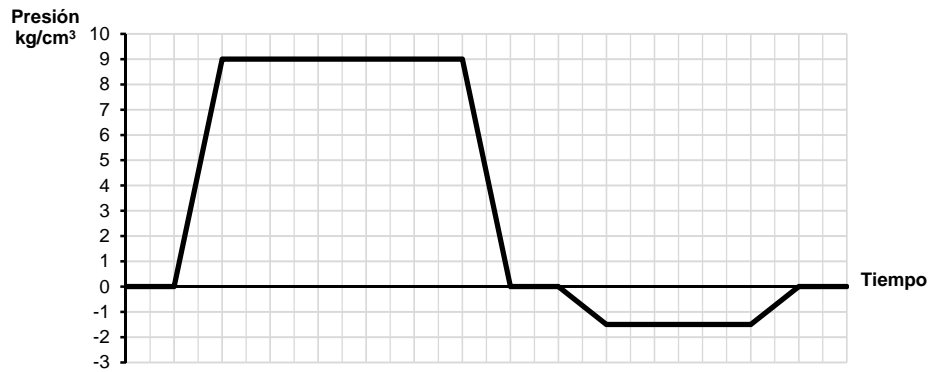


Figura 3.8. Sistema célula vacía

Sistema de doble vacío.

Tratamiento que consigue realizar una protección perimetral de la pared celular y consta de las siguientes fases:

- Vacío inicial, para extraer parte del aire de la madera.
- Introducción del producto a una presión atmosférica.
- Vacío final, para regular la cantidad de protector introducida.

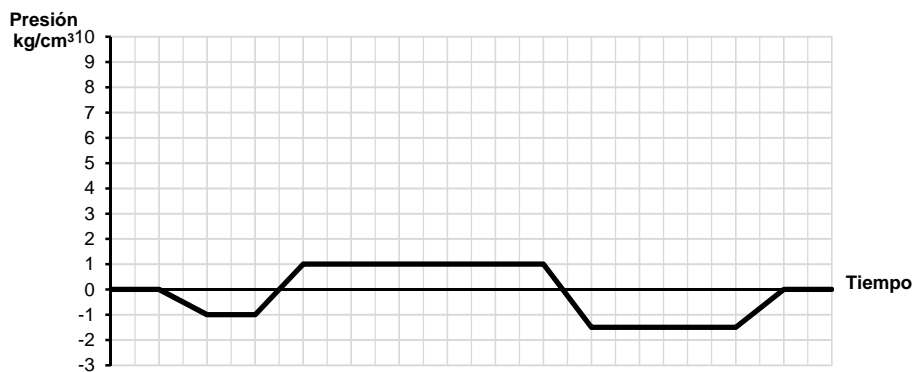


Figura 3.9. Sistema de doble vacío

3.5.2. CLASIFICACIÓN DE IGNIFUGANTES

Según su mecanismo de actuación los productos ignifugantes, con carácter general, pueden agruparse en los siguientes tipos:

Creación de una capa vítrea protectora.

Generalmente se obtienen a partir de boratos y silicatos. Se caracterizan por tener temperaturas de fusión inferiores a la de la combustión de la madera. Al alcanzarlas, se vitrifican rellanando sus poros, lo que evita la penetración de oxígeno hacia las capas interiores y la formación de gases inflamables.

Liberación de compuestos no inflamables.

Dependiendo de la sustancia liberada durante el proceso de combustión, pueden distinguirse tres tipos:

- *Liberan agua.* Ante temperaturas elevadas liberan el agua absorbida junto con el agua de cristalización propia del producto. Se pueden incluir aquí los hidróxidos, que al descomponerse liberan agua.
- *Liberan compuestos orgánicos.* Mediante la reacción de sus componentes con la madera generan compuestos orgánicos que, al ser estables a altas temperaturas, retrasan el proceso de combustión de la madera.
- *Liberan radicales libres.* Suelen contener elementos halógenos, principalmente bromo y cloro. A altas temperaturas liberan el elemento halógeno en forma radical y este reacciona con los radicales libres presentes en la reacción en cadena que tiene lugar durante la combustión, de manera que frena esta reacción e interfiere en el proceso de combustión.

Formación de intumescencia.

Las pinturas y barnices intumescentes aumentan su volumen expuestos a altas temperaturas, generando una capa aislante en la superficie de la madera. Durante el proceso de combustión liberan gases no combustibles que hacen que disminuya la inflamabilidad.

Formación de una capa carbonizada.

Potencian la carbonización de la madera con objeto de incrementar el aislamiento que proporciona la capa carbonizada a las capas interiores de la madera. Durante el proceso, el producto aumenta la emisión de vapor de agua, disminuyendo la formación de gases combustibles y el riesgo de inflamabilidad.

3.6. PRODUCTOS PROTECTORES

Como hemos comentado en el capítulo anterior, existen multitud de productos ignífugantes que mejoran el comportamiento de la madera frente al fuego.

La utilización de protectores ignífugos para proteger la madera es muy antigua, aunque los grandes avances se produjeron a mediados del siglo XX. La mayoría de las combinaciones utilizadas, son productos basados en Fósforo, Nitrógeno, Boro, Sílice y otros como fosfatos de amonio, sulfato de amonio, bórax y ácido bórico.

Para la realización de este estudio se ha decidido impregnar las piezas con una solución de sulfato de magnesio y con otra de borato de sodio.

3.6.1. SULFATO DE MAGNESIO

Su nombre común es Epsomita o sal de Epsom, ya que proviene de la localidad de Epsom (Surrey, Inglaterra) donde se encontró por primera vez. La forma mineral de esta sal es sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Este mineral suele encontrarse como eflorescencias en las paredes de cuevas y en los túneles de las minas de azufre por la deposición de agua rica en magnesio y azufre durante las operaciones de minería. Por lo general, se forma en las regiones áridas y en cuevas que lo protegen de la lluvia y la humedad.



Figura 3.10. Cristal de Epsomita

Este producto no suele utilizarse como protector ignífugo. Su aplicación más frecuente es como fertilizante en los cultivos cuando el suelo carece de magnesio, pero también tiene aplicaciones médicas y se utiliza en la realización de terapias relajantes.

La Epsomita presenta una alta solubilidad a temperatura ambiente y además contiene siete moléculas de agua. Por estos motivos se ha creído conveniente estudiar y analizar si la impregnación de la madera con Epsomita conlleva mejoras en su comportamiento frente al fuego.

Para saber en qué rango de temperaturas la Epsomita pierde estas aguas de composición se ha realizado un análisis termogravimétrico (TGA), el cual evalúa la pérdida de masa por descomposición térmica en presencia de distintas atmósferas. En este caso se realiza en atmósfera de aire.

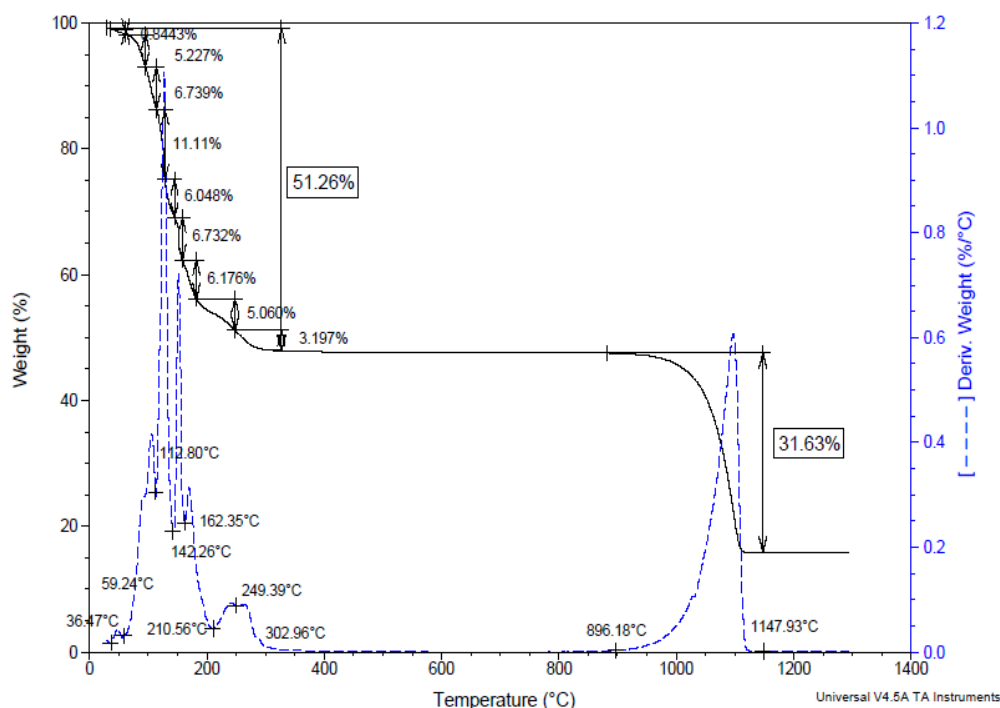


Figura 3.11. Análisis termogravimétrico de Epsomita en aire.

Como vemos en la Figura 3.11 se producen dos grandes curvas de descomposición. La primera curva corresponde a la pérdida de las moléculas de agua y se produce desde los 40°C a los 300°C de temperatura.

3.6.2. BORATO DE SODIO

En este estudio llamaremos a este producto por su nombre comercial, el cual es Neobor. Este mineral se origina de forma natural en depósitos producidos por la evaporación continua de lagos estacionarios. Los depósitos más importantes se encuentran cerca de Boron (California). La forma mineral del Neobor es el borato de sodio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).



Figura 3.12. Cristal de Neobor

Este producto tiene diversas aplicaciones, como la fabricación de fibra de vidrio, esmaltes, detergentes y adhesivos. También se utiliza en la impregnación de madera para su protección frente al fuego. Actúa como retardante de llama, creando una capa vítrea que impide la salida de gases inflamables y la entrada de oxígeno a las capas interiores de la madera, y colabora en el proceso de carbonización.

El Neobor presenta una baja solubilidad a temperatura ambiente, pero va aumentando conforme se aumenta la temperatura de agua en la que se va a disolver. Por otro lado, produce una solución alcalina que es capaz de neutralizar los ácidos.

Por estos motivos, se ha creído conveniente utilizar este producto en el estudio de la mejora del comportamiento de la madera frente al fuego y así, poder comparar sus resultados con los de la madera impregnada con Epsomita.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1. MATERIALES

En este capítulo se describe la primera fase del estudio experimental, que consiste en la preparación y caracterización de las muestras y los productos con los que se van a tratar.

El método de ignifugación por el que se ha optado es la impregnación en profundidad, realizada mediante doble vacío en un autoclave.

4.1.1. MUESTRAS DE MADERA

Para limitar el estudio de tratamiento de la madera a un número adecuado de ensayos, suficiente para poder obtener resultados que se puedan analizar y comparar, y dada la amplia variedad de especies de madera, se ha decidido limitar las muestras a tres tipos de madera, cuya producción, comercialización y aplicación en la construcción, son muy habituales en España.

Tabla 4.1. Denominación de los tipos de madera utilizada

Categoría Botánica	Nombre comercial	Nombre botánico	Nombre proyecto
Conífera	Pino silvestre	Pinus sylvestris	Pino silvestre
	Pino laricio	Pinus nigra	Pino laricio-denso
	Pino laricio	Pinus nigra	Pino laricio-ligero
Frondosa	Haya	Fagus sylvatica	Haya

Las muestras de madera seleccionadas se han obtenido de listones de madera maciza, sin encolar y sin ningún tratamiento previo. Las dimensiones de la muestras se fijaron teniendo en cuenta su facilidad de manejo tanto en el laboratorio, como para los ensayos.

En la selección de las muestras se han descartado todas aquellas que tenían imperfecciones a simple vista como nudos o fendas. En total se han seleccionado 94 muestras, de las cuales 26 han sido utilizadas sin tratar para los diferentes ensayos, 32 para impregnar con Epsomita y 35 para impregnar con Neobor.

Cada muestra ha sido lijada, utilizando un papel de lija de grano no muy grueso, para quitar las imperfecciones causadas al cortarla. Se han numerado para poder seguir un control riguroso de la evolución de cada una, se han medido sus dimensiones (altura, ancho y

espesor) con un pie de rey digital y han sido pesadas con una balanza de precisión de 3 decimales.

Tabla 4.2. Propiedades de las muestras de madera

Tipo de madera	Nº muestras	Dimensiones (mm)	Volumen ($1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$)	Peso (kg)	Densidad (kg/m^3)
Pino silvestre	26	77,3 x 63,7 x 20,8	0,102	0,047	460,8
Pino laricio-denso	25	77,4 x 63,7 x 20,4	0,101	0,066	653,5
Pino laricio-ligero	23	77,5 x 63,8 x 20,5	0,101	0,058	574,3
Haya	20	92,3 x 91,7 x 21,2	0,179	0,129	720,7

Como podemos observar en la tabla 4.2, el pino laricio-denso tiene una densidad mayor a la del pino laricio-ligero, a pesar de pertenecer a la misma especie de madera. Por este motivo se ha decidido diferenciarlos añadiendo el nombre de "denso" y "ligero" a su nombre comercial, en el desarrollo de este proyecto.

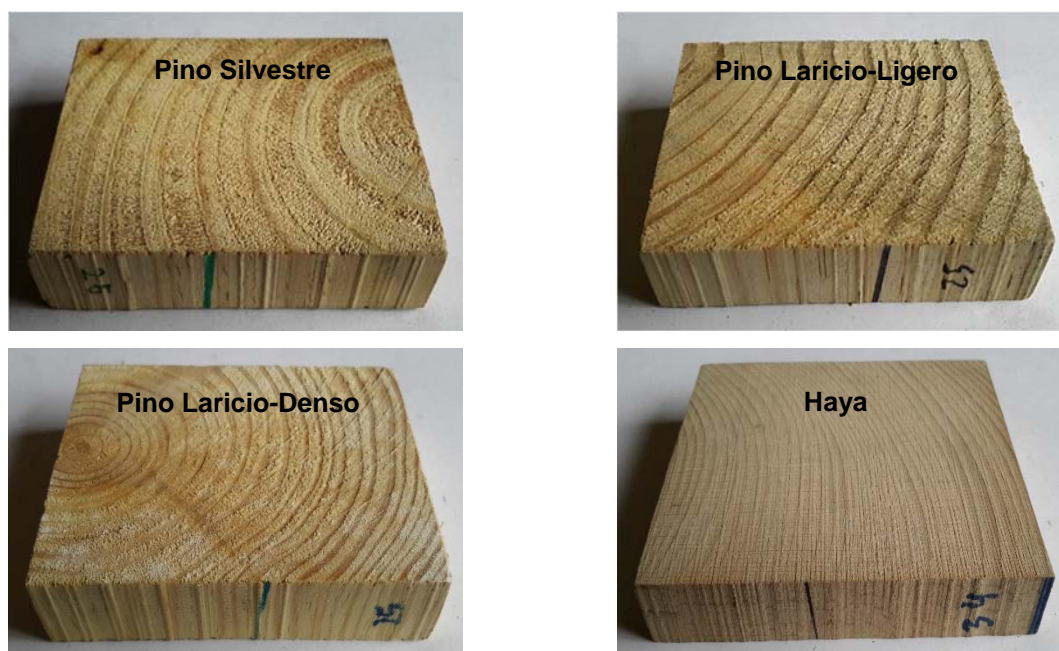


Figura 4.1. Muestras de maderas

4.1.2. SOLUCIONES A IMPREGNAR

Los productos utilizados en la impregnación de las muestras de madera requieren de una preparación previa y de la utilización de diferentes aparatos y herramientas que se describen a continuación.

Para la obtención de las proporciones de cada solución se han tenido en cuenta las condiciones necesarias de temperatura y la solubilidad de cada producto. Estos datos vienen reflejados en las tablas 4.3 y 4.4, donde se indica, en función de la temperatura, los gramos de producto que pueden disolverse en 100g de solución para obtener una solución saturada (saturación).

La impregnación de las muestras se realizara en un recipiente metálico de capacidad 9 litros que se introduce dentro del autoclave. Para calcular el volumen de solución que se necesita, se realiza una inmersión previa con los elementos necesarios para hacer el ensayo y se deduce que el volumen de solución necesaria es 7 litros.

Epsomita

Este producto se presenta en estado sólido, en forma de cristales incoloros/blancos de tamaño y forma de granos de arroz. Los porcentajes de solubilidad en función de la temperatura son los siguientes:

Tabla 4.3. Solubilidad de Epsomita en función de la temperatura

Componente	Temperatura (°C)	Saturación (%)
Sulfato de Magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	22	53%
	40	54%

Considerando que la Epsomita tiene una muy buena solubilidad a temperatura ambiente (22°C), se prepara la solución conforme a los datos de la tabla 5.4. Se calcula que para obtener 8 litros de solución son necesarios 6 kg de Epsomita y 5 litros de agua destilada, ya que al mezclarse la solución aumenta de volumen. Se reserva 1 litros de solución para las sucesivas impregnaciones.

Para disolver la Epsomita en el agua se ha utilizado un taladro manual con una pala agitadora colocado sobre un soporte para taladros. Con este sistema se ha tardado unas 6h en disolver toda la Epsomita.

Debido al excesivo tiempo que se tarda en preparar la solución y teniendo en cuenta los datos de la tabla 4.2, en la que podemos observar que la solubilidad no varía excesivamente al aumentar la temperatura, se decide realizar las sucesivas impregnaciones calentando la solución a 40°C para reducir los tiempos de disolución. En este caso, se calienta la solución, en el mismo recipiente metálico, mediante una placa calefactable y se utiliza un agitador para mantener el líquido en movimiento.

Neobor

Este producto se presenta en forma de polvo de color blanco. Los porcentajes de solubilidad en función de la temperatura son los siguientes:

Tabla 4.4. Solubilidad de Neobor en función de la temperatura

Componente	Temperatura (°C)	Saturación (%)
Borato sódico ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	20	3,59
	40	8,57
	60	23,16

La solubilidad del Neobor es muy baja a temperatura ambiente, tal y como se observa en la tabla 4.4. Por este motivo se prepara la solución tomando los datos de solubilidad a 60 °C. Se calcula que para obtener 7 litros de solución son necesarios 1,6 kg de Neobor y 5,4 litros de agua destilada.

Para realizar la solución se ha calentado el agua a 60°C, en el mismo recipiente metálico, mediante una placa calefactable y se ha utilizado un agitador para mantener el líquido en movimiento. Una vez pesado el Neobor, se ha ido disolviendo poco a poco en el agua caliente.

4.2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y SECADO DE LA MADERA

Los métodos más utilizados para medir la humedad de la madera son el de secado en estufa y el de xilohigrómetro eléctrico. Ambos métodos se encuentran descritos de acuerdo con lo establecido en las normas *UNE-EN 13183-1 y 2. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada*.

Secado en estufa.

Se trata de un método lento y destructivo pero muy exacto, que consiste en extraer una muestra de madera representativa de la pieza a la que se le quiere calcular la humedad. Extraída la muestra es pesada en una balanza, determinándose de esta forma su masa húmeda (M_h). Posteriormente la muestra es introducida en una estufa a $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ hasta que alcanza una masa constante (normalmente 24-48 horas, según tamaño de probeta), momento en el que se vuelve a pesar determinando su masa anhidra (M_0). El valor de la humedad debe ser calculado aplicando la Fórmula 3.1.

Xilohigrómetro eléctrico.

El Xilohigrómetro permite medir las propiedades eléctricas de la madera, tales como la resistencia eléctrica y la constante dieléctrica. A diferencia del método por pesadas este ensayo se caracteriza por ser un método rápido, fácil y portátil, aunque no tan preciso pero lo suficiente entre intervalos de humedades de 7-27%.

Esta técnica permite medir la resistencia eléctrica de la madera mediante electrodos en forma de agujas que se clavan con un golpe en la madera. El higrómetro realiza la conversión de los valores eléctricos a los de contenido de humedad.



Figura 4.2. Xilohigrómetro

Para el método del xilohigrómetro se han utilizado dos probetas, en las cuales se ha determinado la humedad en sentido radial y tangencial.

Para el método de secado en estufa, se han secado todas las muestras de madera en la estufa, a 100°C, pesándolas cada día hasta que su peso fuese constante. Se ha considerado peso constante cuando la diferencia de masa entre dos pesadas consecutivas era inferior al 0,1%.

Tabla 4.5. Humedad de la madera

Tipo de madera	Xilohigrómetro (%)		Por pesadas (%)
	Radial	Transversal	
Pino silvestre	13,2	12,5	12,2
Pino laricio-denso	13,5	13,4	12,4
Pino laricio-ligero	12,9	13,4	12,4
Haya	13,3	13,1	12,2

Los resultados obtenidos en ambos métodos son bastante similares. Se observa que mediante el método del xilohigrómetro se obtienen valores algo más elevados, en torno al 1%, respecto al método de secado en estufa, el cual es más exacto.

Mediante de secado en estufa se ha eliminado el agua libre y el agua de impregnación o saturación que contenían las muestras, lo que permitirá que una mayor cantidad de solución a impregnar penetre a través de los vasos.

4.3. IMPREGNACIÓN

Después de analizar los diferentes sistemas de tratamiento contra el fuego que existen y teniendo la posibilidad de utilizar el autoclave del Laboratorio de Materiales de la EPSEB, se ha decidido realizar una adaptación del método de doble vacío para impregnar las muestras de madera, ya que este autoclave no está homologado para trabajar con presión.

4.3.1. AUTOCLAVE

El autoclave es un recipiente metálico en el que se puede conseguir presión o vacío en su interior y temperatura (normalmente con vapor) que tiene varios tipos de aplicaciones en procesos industriales, procedimientos de esterilización, digestores (normalmente llamados "cocinadores"), impregnación, pegado de vidrios de seguridad, etc. Pueden tener distintos tamaños en cuanto al diámetro como al largo y pueden ser horizontales como verticales, depende del uso específico para el que fueron diseñados y construidos.

Los autoclaves industriales utilizados para la impregnación de maderas tienen grandes dimensiones y suelen disponer de dos cámaras independientes, una para la madera y otra para el producto con el que se tratará la madera y de tablero de programación y control.

El que se va a utilizar para este estudio es un autoclave vertical con un diámetro interior de 45 cm y 150 cm de altura. Dispone de dos cámaras independientes, una bomba de extracción, una puerta con cierre hermético, un vacuómetro y una válvula de escape.

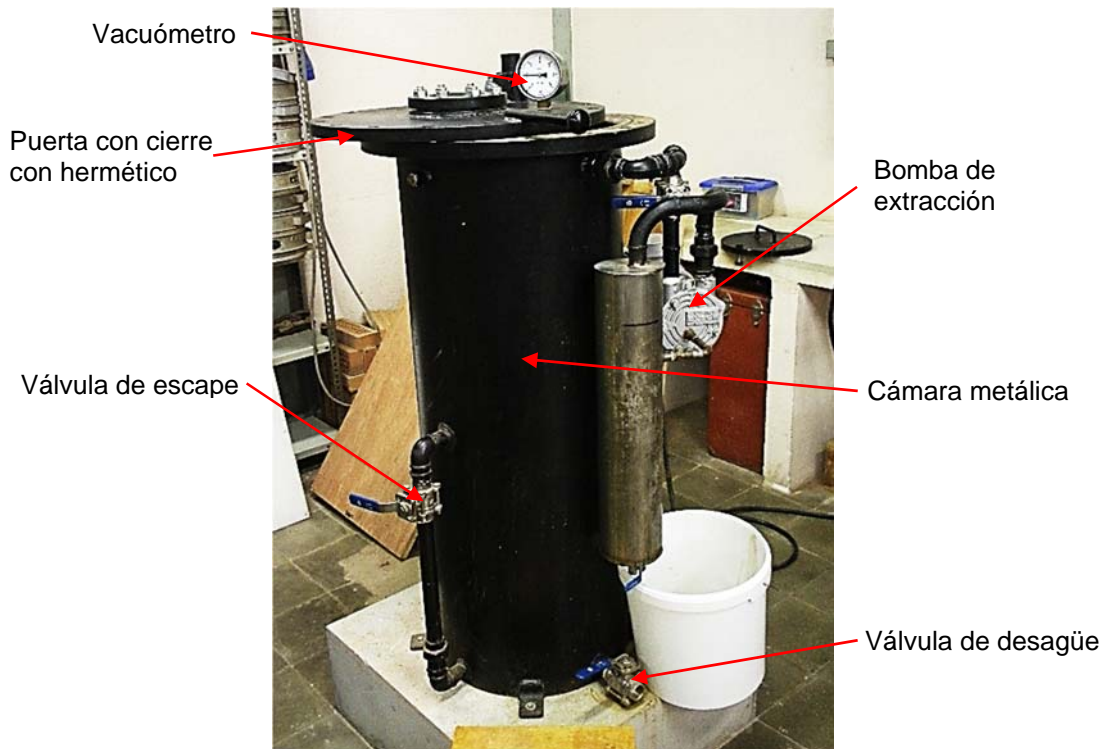


Figura 4.3. Autoclave

4.3.2. IMPREGNACIÓN DE LAS MUESTRAS

El método de impregnación utilizado consiste en hacer que penetren el material disuelto en agua en las muestras de madera hasta la saturación de las mismas, introduciendo el recipiente con la disolución y la madera sumergida en el interior del autoclave donde se ha realizado un proceso de doble vacío.

Para introducir las muestras de madera en la solución, se ha hecho una jaula con malla de plástico, que consta de varios compartimentos para poder mantener las piezas separadas las unas de las otras, y otros compartimentos para colocar unos pesos que evitarán que la jaula flote dentro de la solución. Al no tener todas las muestras las mismas dimensiones, se hacen dos tipos de jaula. Una para las muestras de pino, en la que caben 10 muestras en posición horizontal, y otra para las muestras de haya, en la que caben 7 muestras en posición vertical.

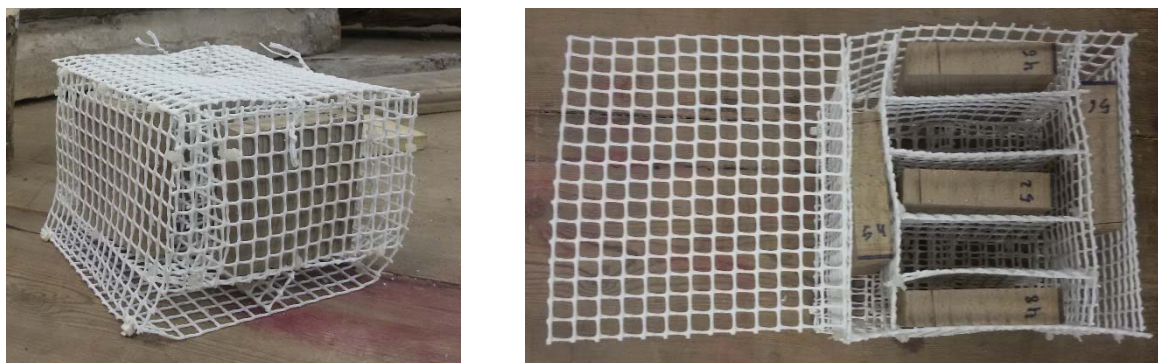


Figura 4.4. Jaula para muestras de Haya

Una vez preparada la solución que va a utilizarse en cada caso, se extraen de la estufa las muestras de madera que se van a tratar, se pesan con la báscula digital y se introducen en la jaula junto con los pesos. Posteriormente se coloca la jaula y la solución dentro del recipiente metálico y, éste se introduce en el autoclave. Una vez cerrado el autoclave, se realiza el vacío y se dejan las muestras en bajo vacío durante 15 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se abre la válvula de escape para volver a presión atmosférica y se realiza un segundo vacío dejando las muestras en bajo vacío durante 7 horas. Tras este tiempo, se vuelve a presión atmosférica de nuevo y el autoclave puede abrirse para extraer las muestras impregnadas.

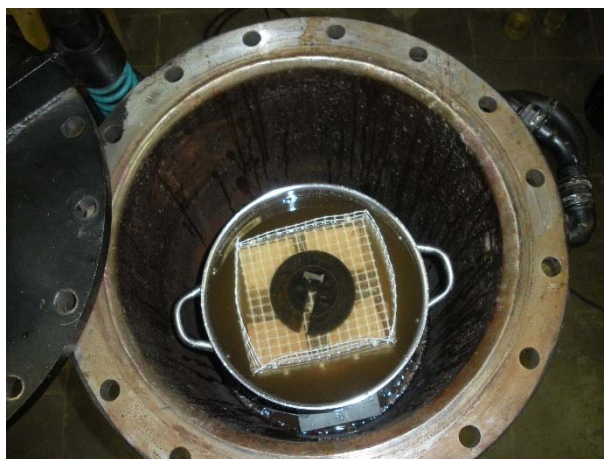


Figura 4.5. Muestras sumergidas en solución en la cámara del autoclave.

Finalizado el proceso de impregnación, las muestras se extraen del autoclave. En algún caso, se observa una gran cantidad de cristales sobre la superficie de las muestras. Esto se debe a que la solución, al estar saturada, precipita formando cristales que se incrustan en la superficie de las muestras.



Figura 4.5. Cristales de Epsomita y Neobor en muestras impregnadas.

A continuación, se preparan las muestras para realizar la validación de la impregnación y los ensayos de comportamiento al fuego. Primero se cepilla la superficie de las muestras para eliminar los cristales y dejar la superficie totalmente lisa. Seguidamente, se realiza el secado de las muestras en la estufa a 35°C.

En esta ocasión, el secado se realiza a esta temperatura debido a que la Epsomita empieza a perder agua de su composición a partir de los 35-40°C, produciendo eflorescencias en la superficie de la madera.

Las muestras se pesan periódicamente y, a pesar de la precaución de secarlas a una baja temperatura, se observa que igualmente aparecen eflorescencias tanto en las muestras impregnadas con Epsomita, como en las muestras impregnadas con Neobor, como se muestra en la Figura 5.4. Para evitar que estas eflorescencias alteren los resultados de los ensayos posteriores, las muestras se cepillan dejando la superficie de nuevo lisa.



Figura 4.6. Eflorescencias de Epsomita y Neobor en muestras impregnadas.

4.4. EVALUACIÓN DE LA IMPREGNACIÓN

Tras el proceso de impregnación y posterior secado de las muestras de madera, se analiza cuantitativa y cualitativamente el nivel de penetración de las soluciones en los diferentes tipos de madera.

4.4.1. ANÁLISIS CUANTITATIVO

El análisis cuantitativo consiste en determinar la cantidad de producto que ha penetrado en las muestras impregnadas realizando un estudio por diferencia de pesos entre las muestras anhidras y las impregnadas y secadas a 35°C.

Para obtener unos resultados más precisos se ha tenido en cuenta que la madera secada a 35°C tiene una determinada humedad. Para poder calcular esta humedad se realiza el proceso de impregnación anterior en dos muestras de cada tipo de madera sin tratar, pero impregnándolas con agua destilada. El contenido de humedad que se obtiene está en torno al 6% en todos los tipos de madera y se suma al peso de las muestras anhidras para poder compararlas con las muestras impregnadas.

Tabla 4.6. Producto impregnado en cada tipo de madera

Tipos de madera	Epsomita (%)	Neobor (%)
Pino silvestre	46	3
Pino laricio-denso	55	7
Pino laricio-ligero	78	9
Haya	20	7

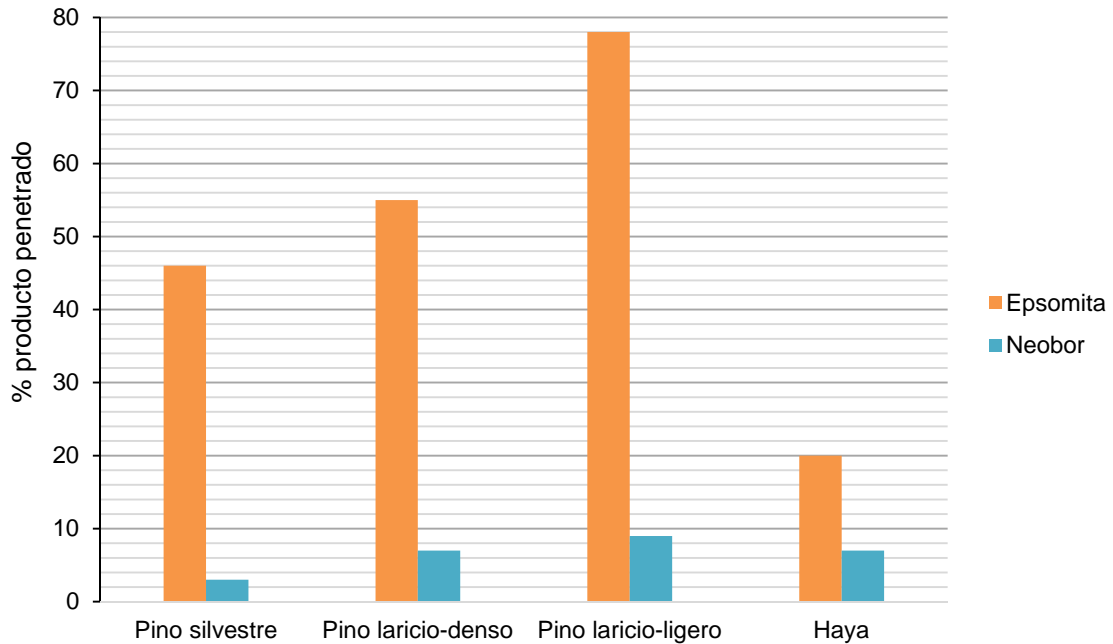


Figura 4.7. Gráfica comparativa del porcentaje de penetración de cada producto.

Tanto en la tabla como en el gráfico, se observa la cantidad media de Epsomita y de Neobor que ha penetrado en cada tipo de madera. Destaca, principalmente, que los porcentajes de Epsomita son muy superiores a los de Neobor. Esta diferencia se debe al mayor porcentaje de producto disuelto en la solución con la que se impregnaron las muestras.

Por otro lado, el pino laricio-ligero muestra un porcentaje mayor en ambos productos, 78% y 9%. Uno de los motivos de esta diferencia es que cada tipo de madera tiene una estructura microscópica diferente, pero también cabe destacar que el pino laricio-denso, de la misma especie que éste, presentaba un aspecto más resinoso, lo que puede haber sido un inconveniente en el proceso de impregnación.

4.4.2. ANÁLISIS CUALITATIVO

El análisis cualitativo se ha realizado mediante la observación, de las muestras de madera impregnadas, con el microscopio electrónico de barrido SEM (Scanning Electron Microscopy). Este sistema permite la observación de las muestras sin ningún tipo de recubrimiento, ya que se realizan en condiciones de bajo vacío, y la determinación de los elementos químicos mediante la espectrometría de dispersión de energía de rayos-X (EDS)

La visualización de las muestras mediante SEM se realiza en los *Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona*, mediante un dispositivo FEI QUANTA 200 acompañado de un soporte informático para el procesado de datos.

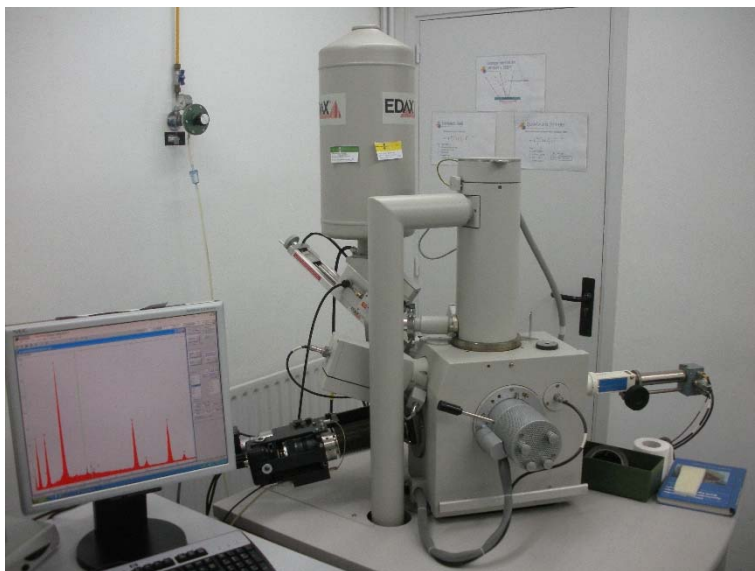


Figura. 4.8. Equipo de microscopía electrónica de barrido

Para la visualización mediante el microscopio se seleccionan las muestras impregnadas más representativas, que son las siguientes:

Tipo de madera	Epsomita	Neobor
Pino laricio-ligero	M28	M17
Haya	M12	M48

También se seleccionan una muestra sin tratar de cada tipo de madera para poder comparar las imágenes obtenidas: Pino laricio-ligero (M36) y Haya (M27). Los resultados de estas muestras se adjuntan en las fichas de trabajo anexadas al final de esta memoria.

De cada muestra se extrajeron dos probetas de unos 20x20x3 mm, realizando un corte en dirección radial y otro en dirección tangencial, como se muestra en las figuras 6.2 y 6.3. Los cortes se realizaron intentando que fuesen precisos y limpios. Sin embargo, es imposible evitar que se desprenda la mayor parte del producto impregnado en los vasos cortados, por este motivo, en las imágenes del microscopio que se muestran más adelante, no se observan los vasos tan llenos como se podría esperar.

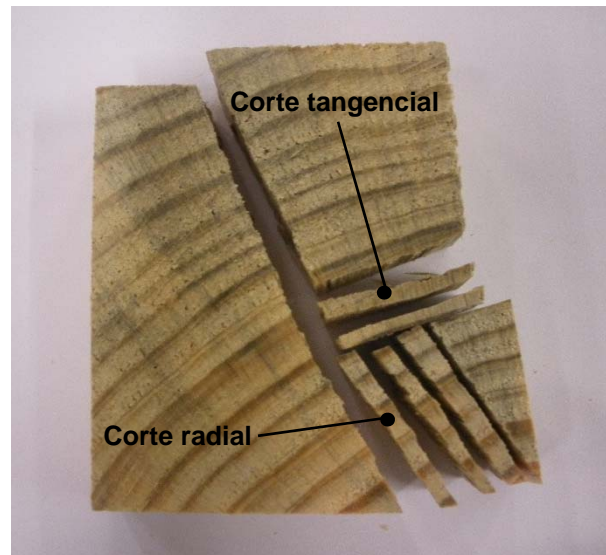


Figura 4.9. Cortes en muestra de pino laricio-ligero

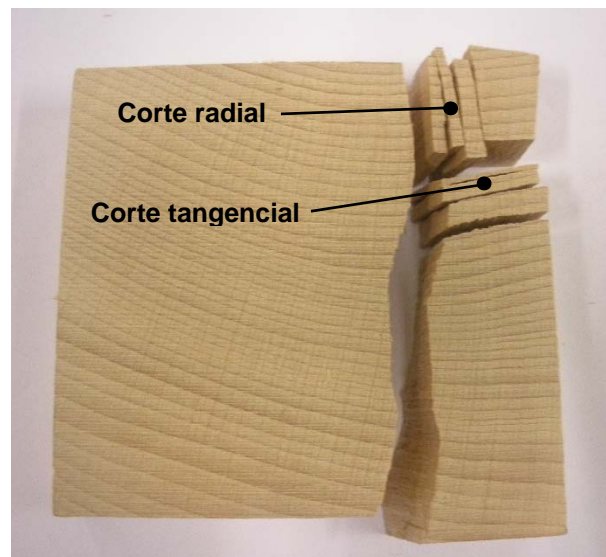


Figura 4.10. Cortes en muestra de haya

A continuación se analizan los resultados obtenidos en la microscopía electrónica realizada en las muestras impregnadas que hemos comentado. Primero, se toman las imágenes mediante el detector de electrones retrodispersados (DualBSD) y a continuación, se realiza un análisis químico (EDS) para comprobar la presencia del producto en el interior de la muestra. Se debe tener en cuenta que las imágenes tomadas con el detector DualBSD presentan diferentes tonalidades dependiendo del peso atómico de los elementos.

Muestra M28. Pino laricio-ligero impregnado con Epsomita.

Imagen del corte radial:

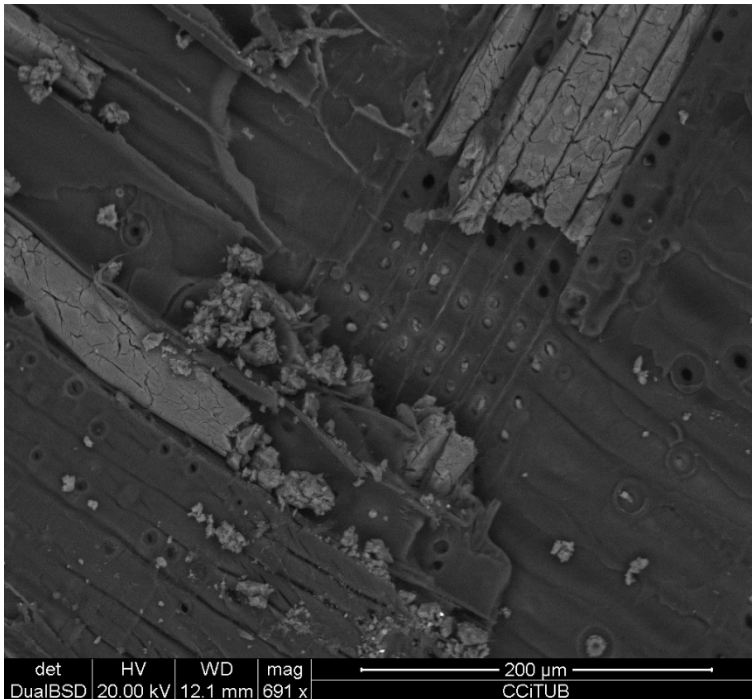
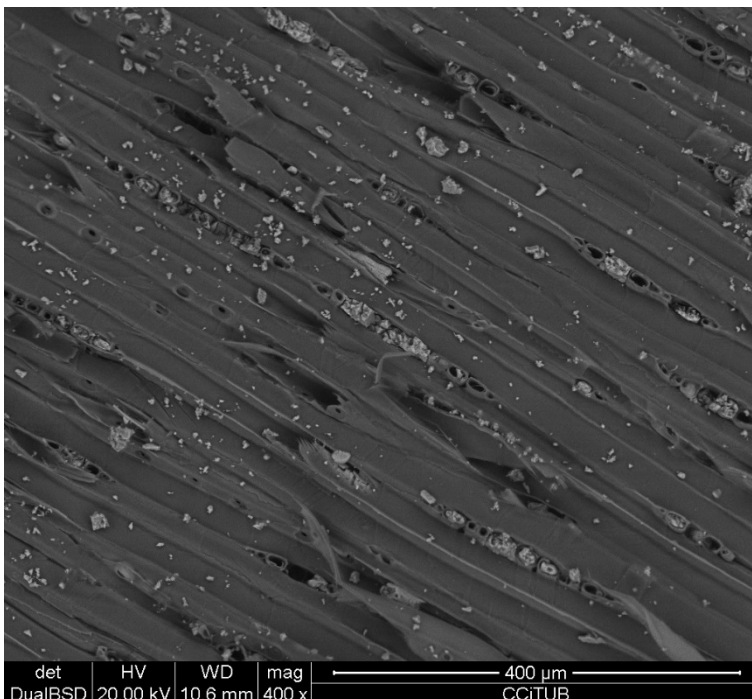
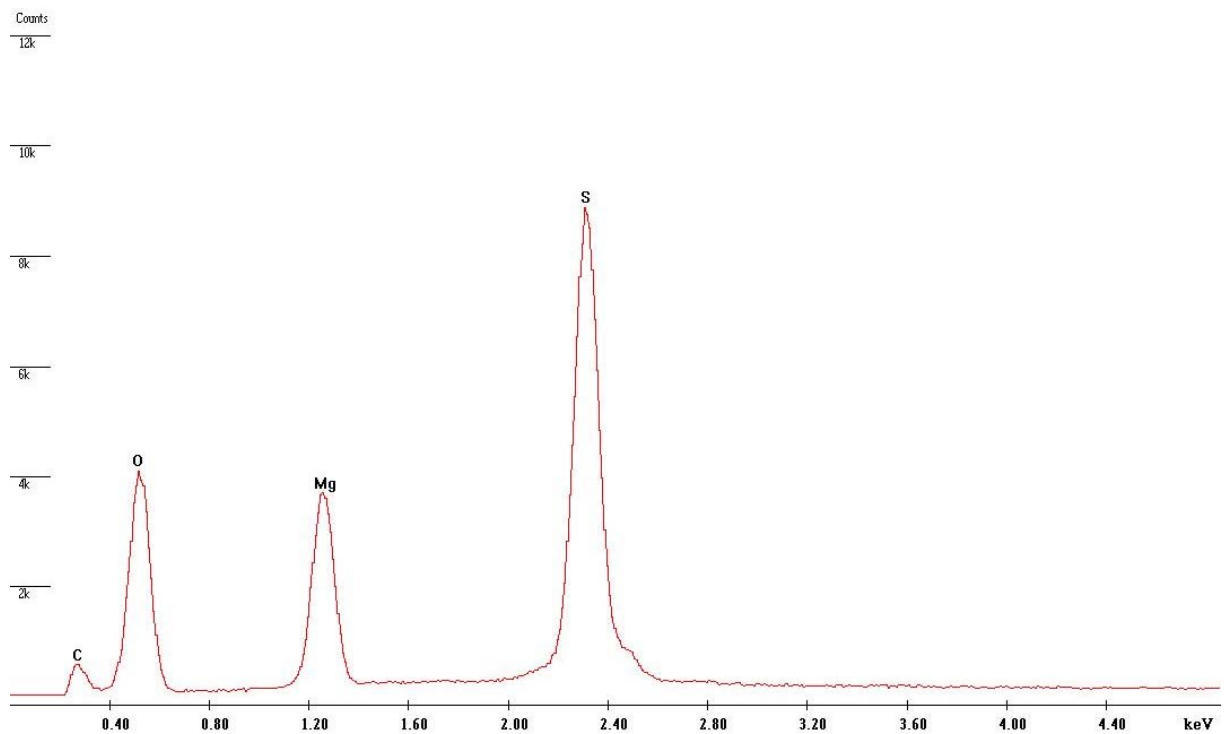


Imagen del corte tangencial:



Análisis químico (EDS):

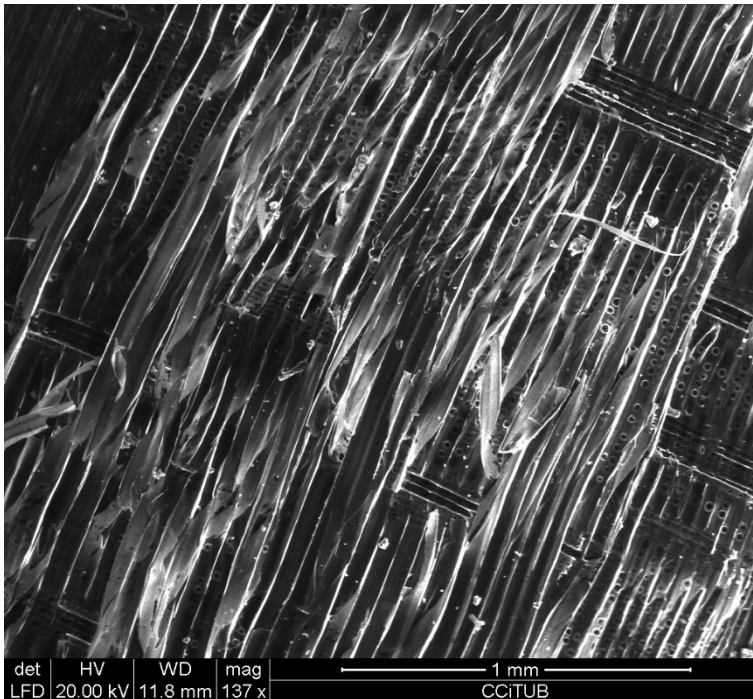


En la imagen del corte radial se observa claramente la penetración de la Epsomita a través de las traqueidas y en la del corte tangencial se observa la sección de los radios leñosos que contienen también Epsomita. Lo que significa que la muestra se ha impregnado en ambas direcciones.

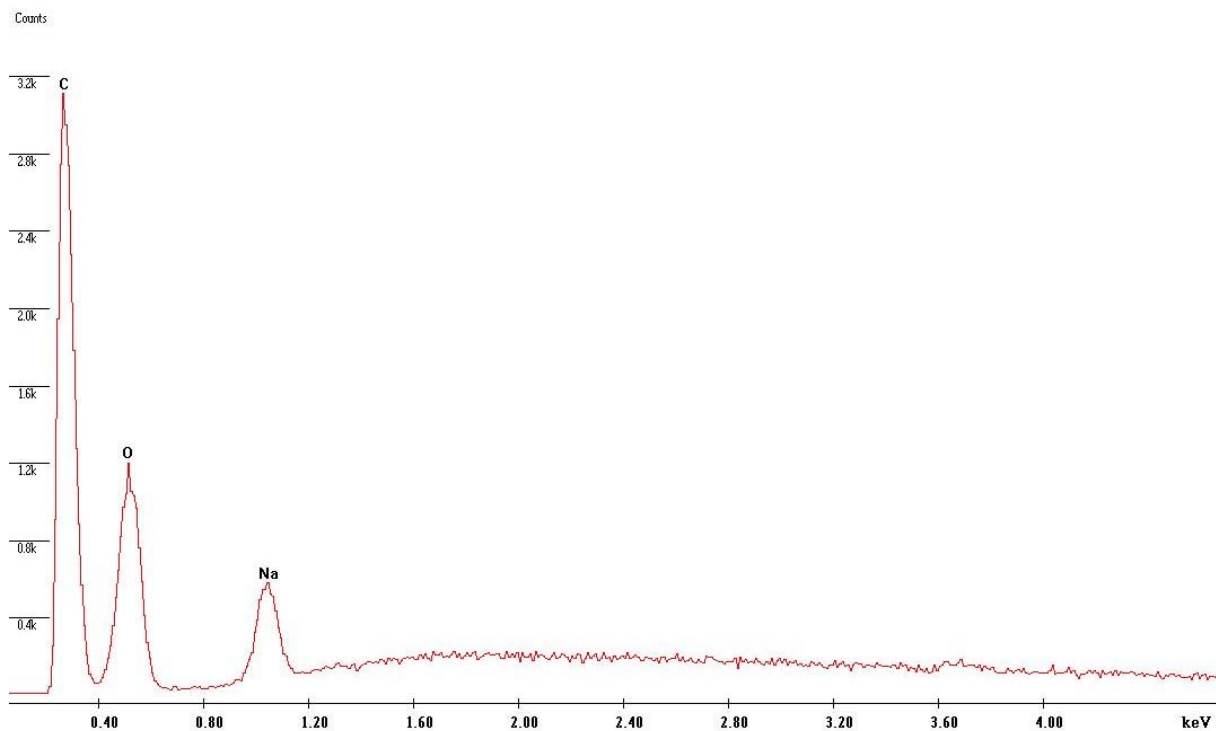
Examinando los resultados del análisis químico (EDS), se observa la presencia de azufre (S) y magnesio (Mg), lo que confirma que el producto que observamos en las imágenes es Epsomita.

Muestra M17. Pino laricio-ligero impregnado con Neobor.

Imagen del corte radial:



Análisis químico (EDS):



La imagen del corte radial está hecha con el detector LFD (large field detector), ya que con el detector DualBSD no se apreciaba la presencia de partículas o elementos diferentes a los de la estructura microscópica de la madera.

En dicha imagen vemos una gran diferencia con la muestra impregnada con Epsomita. Las traqueidas no aparecen llenas como en el caso anterior, sino que se observan una serie de partículas dispersas, las cuales podrían ser Neobor. Esto concuerda con los datos obtenidos en el análisis cuantitativo que reflejaban un porcentaje de impregnación muy bajo con Neobor respecto a la Epsomita.

Examinando los resultados del análisis químico (EDS), se observa la presencia de sodio (Na), lo cual confirma que la muestra contiene Neobor.

Muestra M12. Haya impregnada con Epsomita.

Imagen del corte radial:

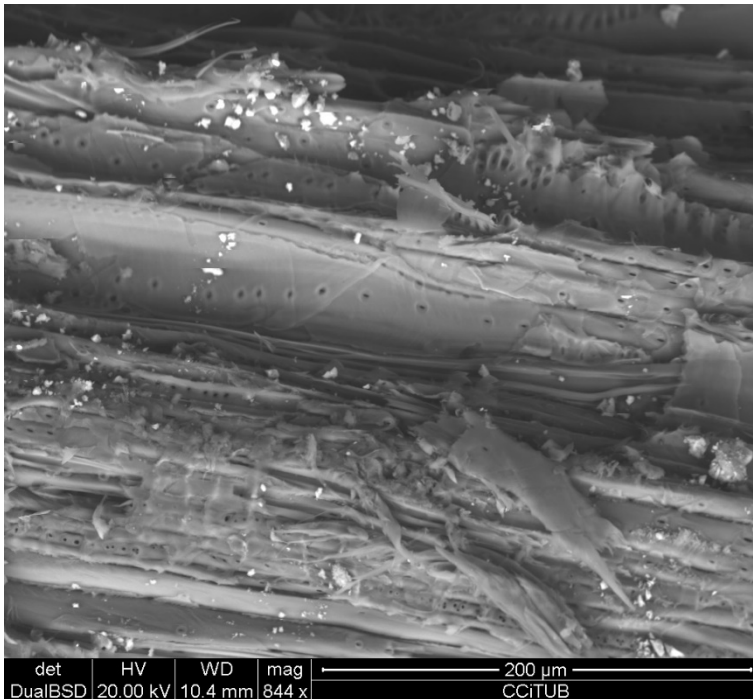
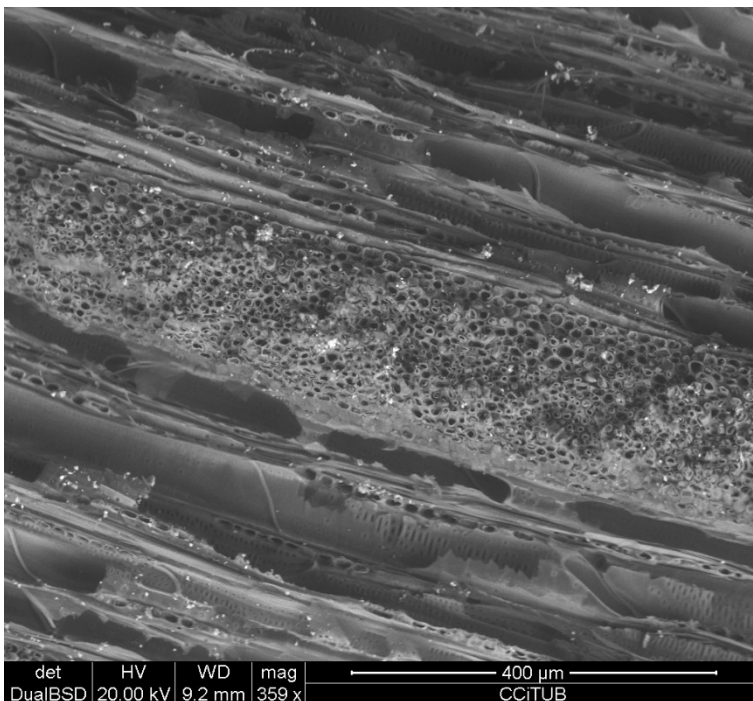
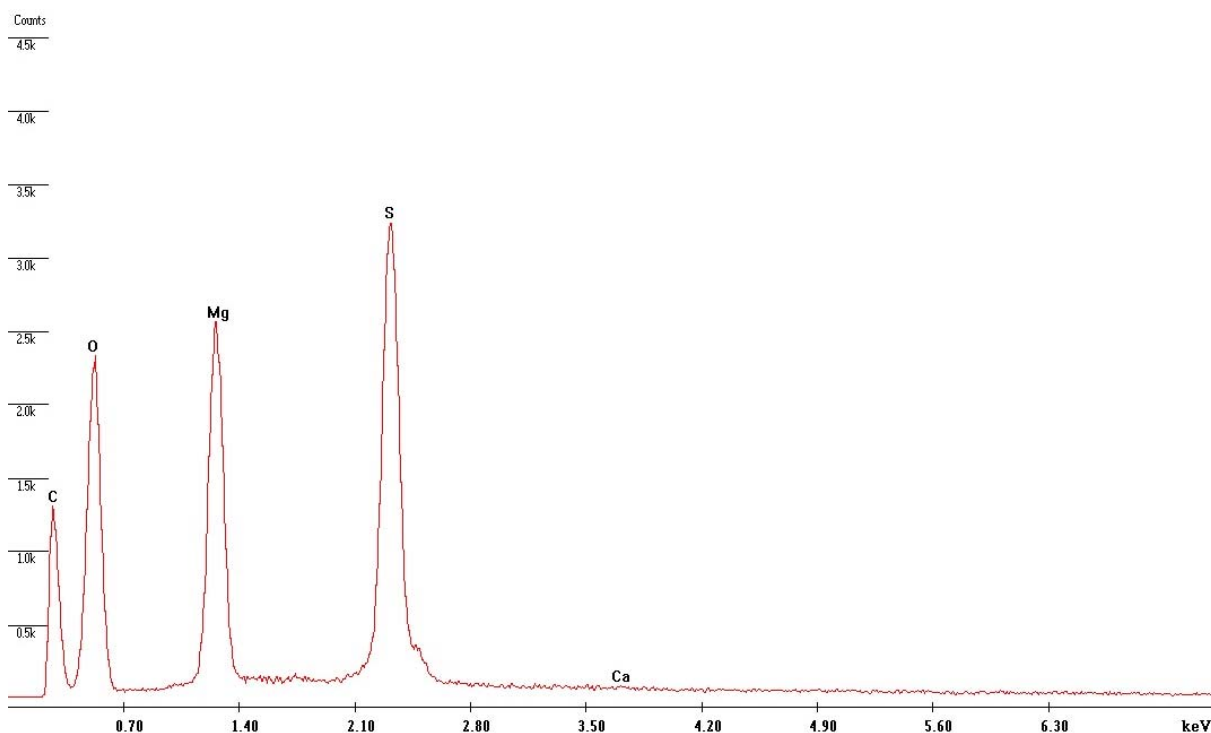


Imagen del corte tangencial:



Análisis químico (EDS):



En la imagen del corte radial se observan partículas de color blanco, que podríamos decir que son Epsomita, en los vasos de la madera y en la imagen del corte tangencial aparece un radio leñoso multiseriado, en el cual también se aprecian partículas de Epsomita.

Comparando estas imágenes con las de pino laricio-ligero, observamos que la cantidad de Epsomita es menor, confirmando el análisis cuantitativo. Una de las causas se debería a la compleja microestructura de la madera de haya que hace más difícil la impregnación.

Examinando los resultados del análisis químico (EDS), se observa la presencia de azufre (S) y magnesio (Mg), lo que confirma que el producto que observamos en las imágenes es Epsomita.

Muestra M48. Haya impregnada con Neobor.

Imagen del corte radial:

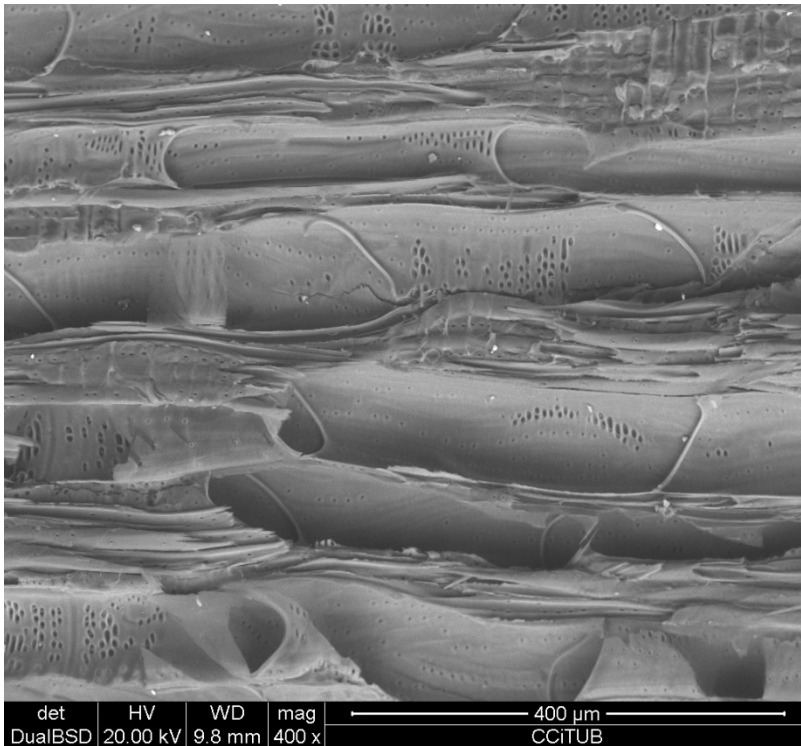
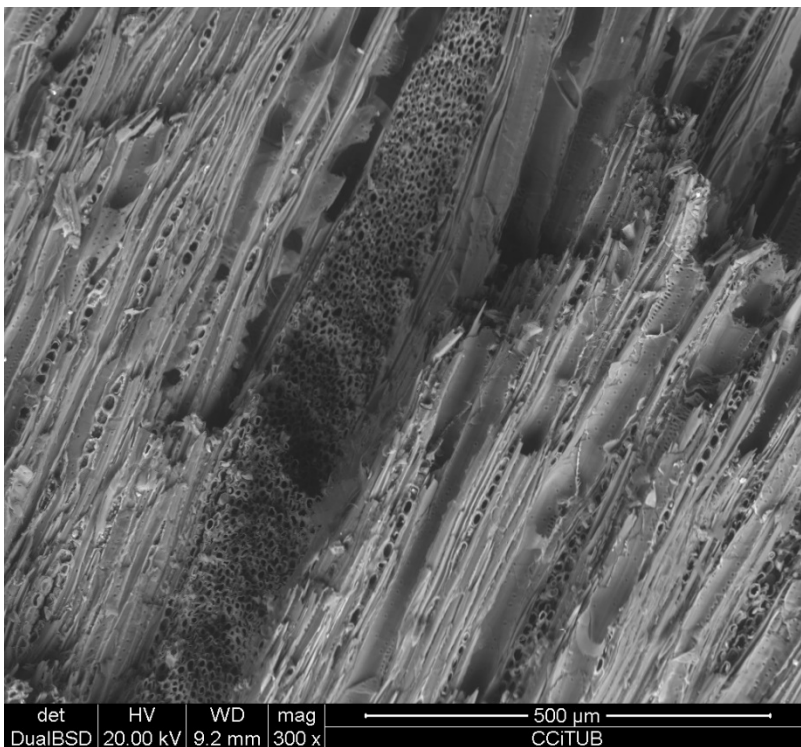
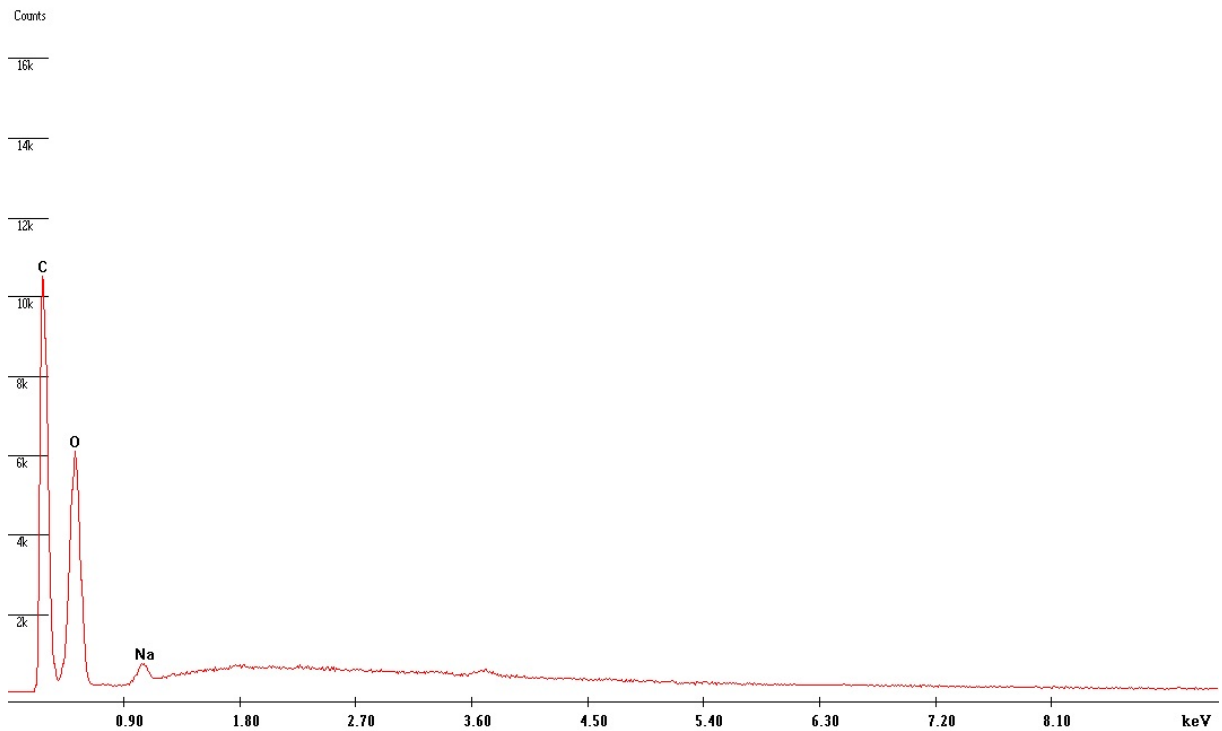


Imagen del corte tangencial:



Análisis químico (EDS):



En la imagen del corte radial se observan algunas partículas de color blanco en el interior de los vasos, que podríamos decir que son Neobor, y en la imagen del corte tangencial, en la parte inferior derecha también se aprecian unas partículas de Neobor.

Comparando estas imágenes con las impregnadas con Epsomita, observamos que la cantidad de partículas de Neobor es menor, confirmando el análisis cuantitativo.

Examinando los resultados del análisis químico (EDS), se observa la presencia de sodio (Na), lo cual confirma que la muestra contiene Neobor.

4.5. ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO AL FUEGO

En este estudio se ha optado por someter las muestras impregnadas a dos ensayos normalizados y a otro, desarrollado y adaptado en el laboratorio, al que llamamos ensayo con Bunsen, con el fin de simular, en circunstancias controladas, lo que podría ser la causa de iniciación de una llama y la propagación de la misma causando un incendio.

Estos tres ensayos se han adaptado a las circunstancias del Laboratorio y al estudio que deseamos realizar, pero siempre definiendo unos criterios fijos e inalterables para todas las muestras ensayadas.

4.5.1. ENSAYO DE GOTEÓ

En la realización de este ensayo se ha utilizado el equipo descrito en la *Norma UNE-EN 23725:1990*, en la que se describe el método de ensayo de reacción al fuego aplicable a los materiales fusibles de cualquier espesor, con el fin de contribuir a su clasificación en lo que concierne a su comportamiento frente al fuego como materiales de construcción.

El ensayo consiste en someter las muestras a la radiación de una fuente de calor constante y provocar eventualmente la inflamación de los gases desprendidos y la caída de gotas inflamadas o no inflamadas.

Para el desarrollo de este ensayo se ha utilizado:

- Un radiador de una potencia nominal de 500W cuya superficie radiante es un disco de cuarzo transparente de 10 mm de diámetro
- Un soporte de probeta formado por un anillo metálico fijo, horizontal, de 122 mm de diámetro interior, sobre el que se coloca una rejilla metálica movable de 118 mm de diámetro.
- Un vatímetro y un regulador de tensión.
- Un cronómetro.
- Una campana extractora.

Previamente al inicio del ensayo se pone en funcionamiento el equipo de tensión subiendo la potencia paulatinamente hasta alcanzar los 490W. Una vez alcanzada esta potencia, se coloca la muestra sobre el soporte y se regula para que la distancia entre el radiador y la cara superior de la muestra sea 30 mm.

El ensayo se inicia con el cronómetro en tiempo 0 y colocando el radiador sobre la superficie de la muestra hasta que la muestra inflame. Cada vez que inflama, se retira el radiador (esperando siempre 3 segundos) y al extinguirse la llama se vuelve a colocar el radiador sobre la muestra. Se repite el proceso tantas veces como suceda durante 5 minutos, tomando los tiempos de ignición de y extinción de la llama.

Dimensiones en milímetros

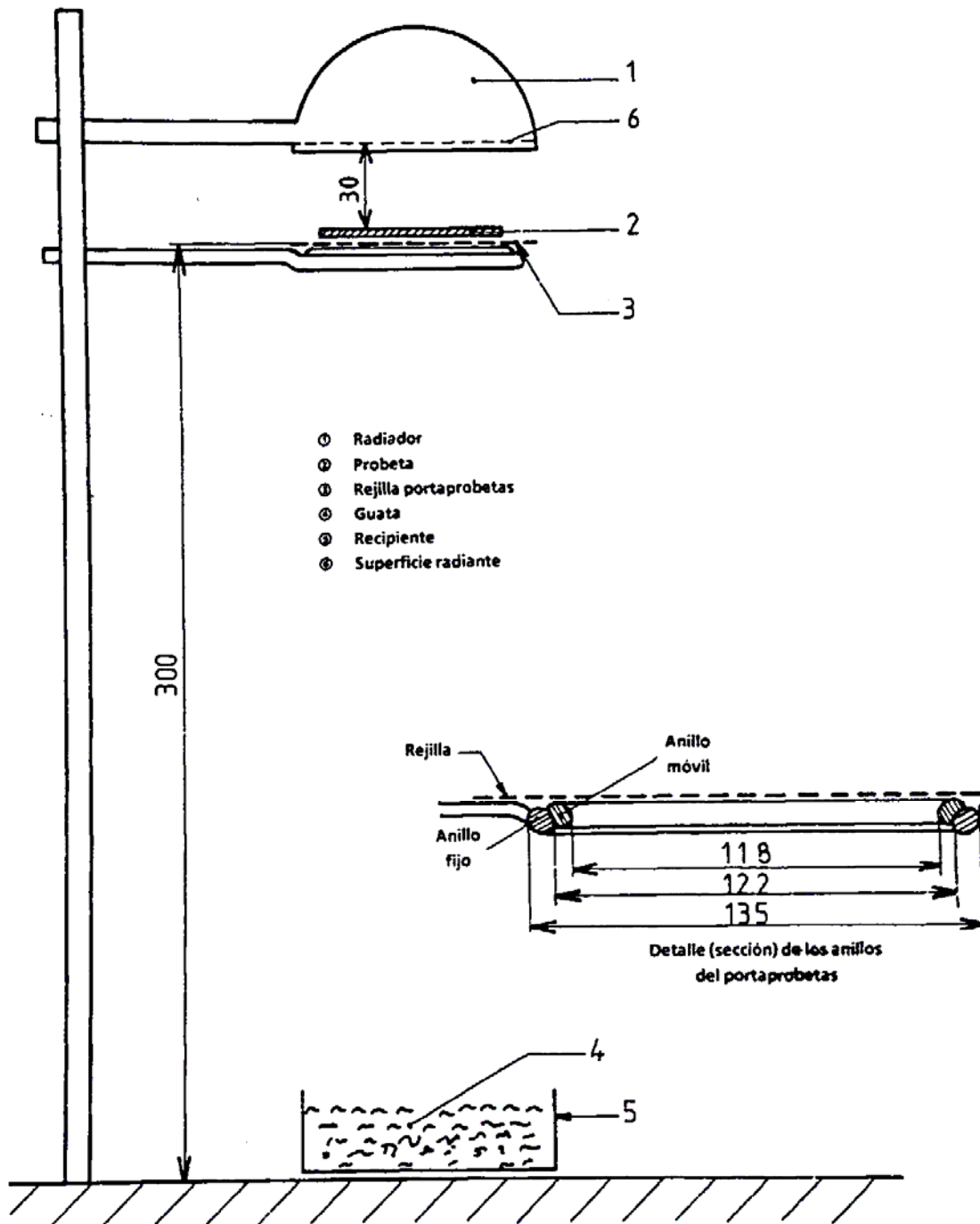


Figura 4.11. Esquema de ensayo complementario para materiales fusibles

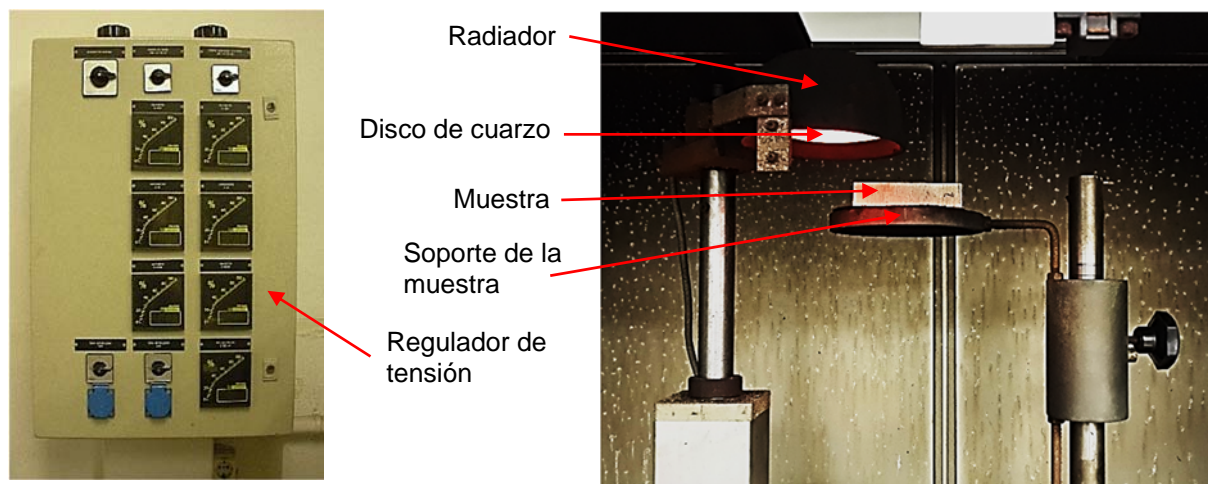


Figura 4.12. Aparatos utilizados en el Ensayo de Goteo

4.5.2. ENSAYO CON BUNSEN

Para la realización de este ensayo se ha utilizado una estructura preparada y construida en el Laboratorio. La idea surge a partir de un ensayo de inflamabilidad para productos intumescentes para elastómeros termoplásticos recogido en el artículo de Ismart A.Abu-Isa, "Intumescent Thermoplastic Elastomer Fire Shield Material".

El ensayo consiste en registrar con el tiempo, la temperatura en la cara inferior de la muestra, sometida a la llama, y la temperatura en la cara superior. Esto nos permite evaluar si la adición de ignifugantes permite retrasar el avance de la temperatura a lo largo de la muestra de madera.

Para el desarrollo de este ensayo se ha utilizado:

- Quemador tipo Bunsen.
- Estructura compuesta por placas de acero para soporte de la muestra.
- Termopares.
- Receptor de termopares (datalogger).
- Cronómetro.
- Bombona de gas.

Previamente al inicio del ensayo se coloca la muestra sobre el soporte y se le fijan tres termopares distribuidos de la siguiente forma: cara inferior posición central (Tic), cara superior posición central (Tsc) y cara superior posición exterior (Tse).

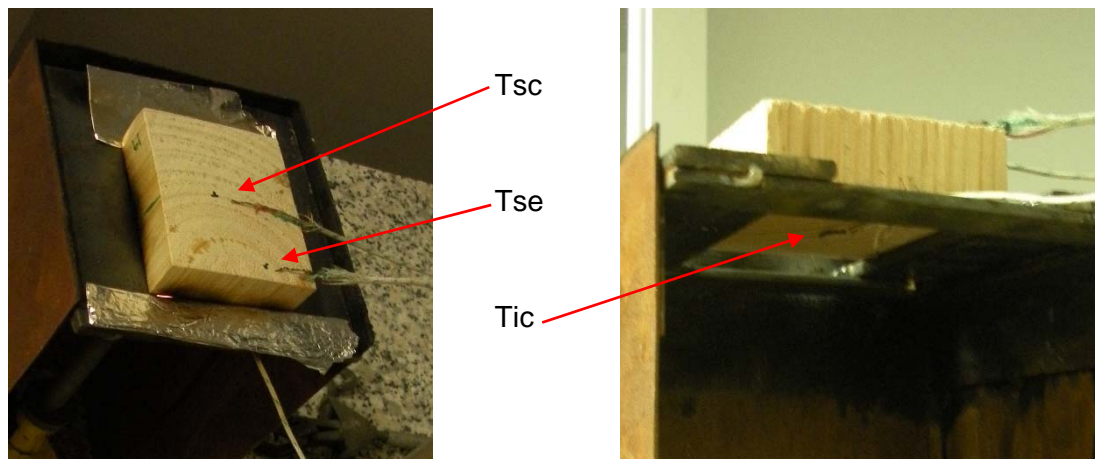


Figura 4.13. Posición de termopares en muestra de madera

En el interior de la cámara se coloca el mechero Bunsen. La llama debe generar un cono azul de altura 60 mm aproximadamente e incidir de forma directa en la muestra. El proceso se mantiene durante 15 min. Durante el tiempo que transcurre el ensayo, los termopares analizarán la evolución de las temperaturas en cada una de las posiciones.

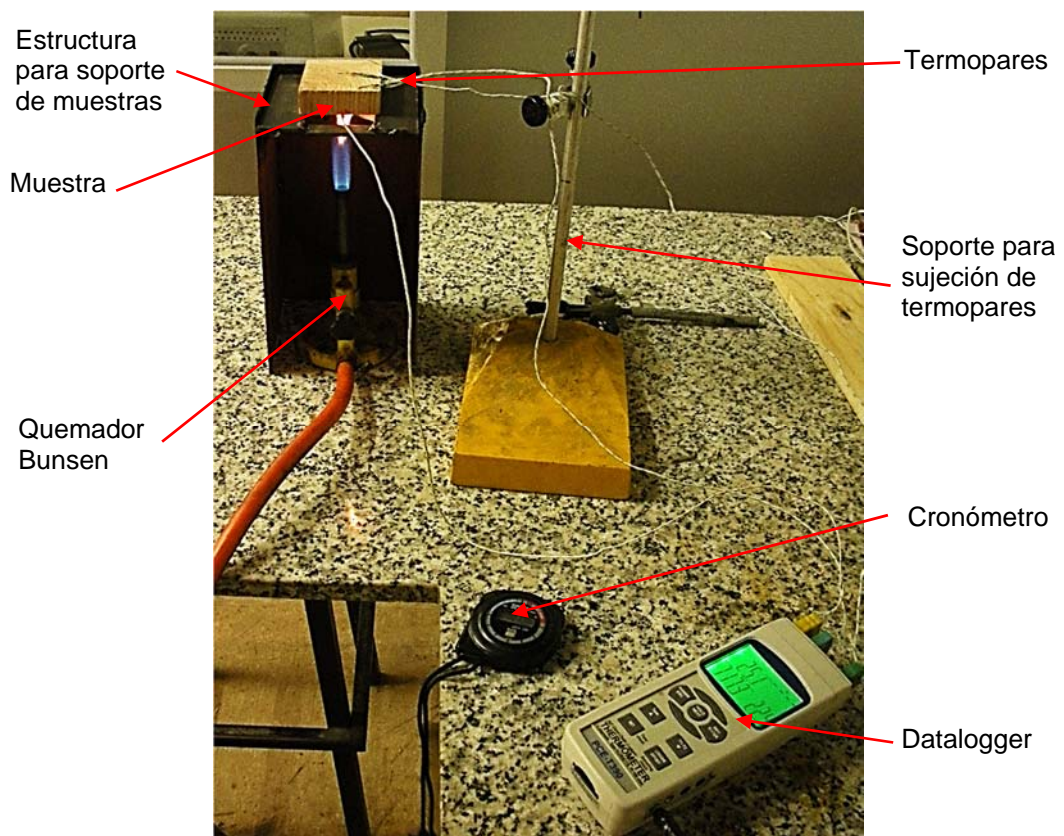


Figura 4.14. Aparatos utilizados en el Ensayo con Bunsen

4.5.3. ENSAYO DE ÍNDICE DE OXÍGENO (L.O.I.)

Este ensayo está regulado por la *Norma UNE-EN ISO 4589-2:2001* y con él se pretende determinar el comportamiento al fuego de la muestra mediante el índice de oxígeno. El índice de oxígeno se refiere a la mínima concentración de oxígeno que soportará la combustión de un material. Cuanto mayor resulte el índice de oxígeno de un material, más oxígeno será necesario para que se produzca la combustión, por tanto su comportamiento frente al fuego en condiciones normales será mejor que el de otro material que cuyo índice de oxígeno sea menor.

El equipo utilizado para este ensayo está formado por:

- Columna de vidrio resistente al calor, de 450 mm de altura y 95 mm de diámetro, sobre una base por la que puede introducirse la mezcla de oxígeno y nitrógeno.
- Soporte metálico para la muestras.
- Suministro de gas (fuentes presurizadas de oxígeno y nitrógeno).
- Suministro de gas propano.
- Encendedor de llama.
- Caudalímetro, que analiza y mide las la proporción de oxígeno y nitrógeno.
- Cronómetro.

La primera muestra a ensayar siempre ha sido una sin tratar para poder tener una referencia de la proporción de oxígeno y nitrógeno de la que partir para los posteriores ensayos de las muestras tratadas.

El ensayo consiste en determinar entre qué proporciones de oxígeno la muestra quema o no quema. Para ello, se coloca la probeta en el soporte y la columna de vidrio sobre su base, se abren las llaves de los suministros de gas y se enciende el rotámetro regulando la proporción de oxígeno. A continuación, se aplica la llama sobre la probeta con el soplete durante un tiempo máximo de 30 segundos, retirando la llama cada 5 segundos para verificar si la muestra está ardiendo. En ese instante se debe controlar el tiempo de combustión y, tras su completa extinción, la altura de la muestra quemada.

Los parámetros que se han tenido en cuenta a la hora de interpretar los resultados han sido: la concentración de oxígeno necesaria, el periodo de combustión, la longitud quemada y la respuesta a si quema o no quema la muestra.

Se considera que una probeta no quema si no supera los 50 mm de longitud quemada y si no supera un periodo de combustión de 3 minutos. Cuando esto sucede, se ensaya otra probeta aumentando el porcentaje de oxígeno. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario hasta que se superen estos parámetros, es ese caso se considerará que la muestra si quema. El resultado será el máximo porcentaje de oxígeno en el que se considera que la muestra quema y el mínimo en el que se considera que la muestra no quema.

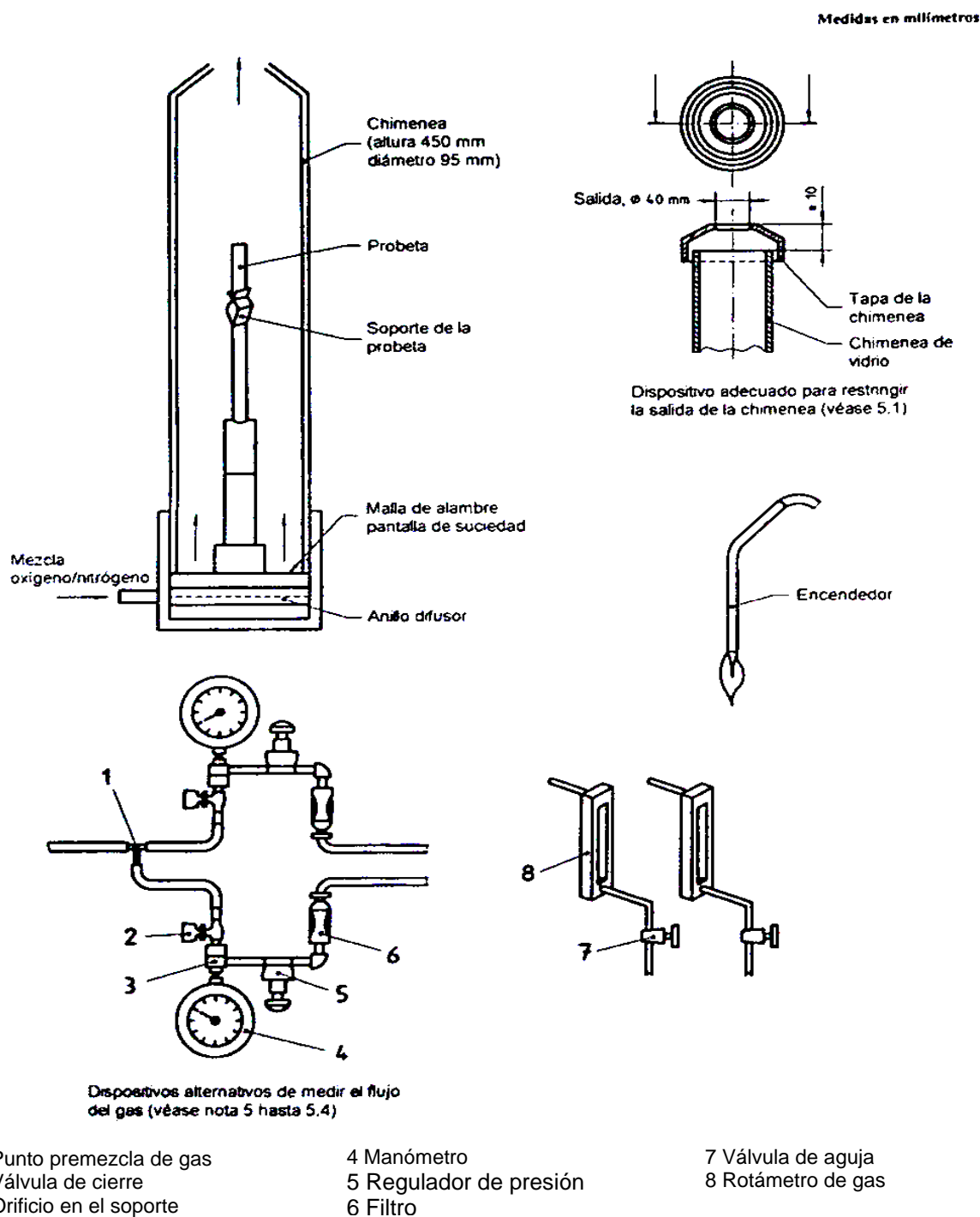


Figura 4.15. Esquema del aparato típico para determinación del índice de oxígeno



Figura 4.16. Aparatos utilizados en el ensayo de L.O.I.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez completadas las fases de preparación del material, impregnación y validación de la impregnación se llevan a cabo los ensayos de comportamiento al fuego.

En este capítulo se realiza un análisis y estudio comparativo de los resultados de los ensayos para comprobar si los tratamientos de impregnación con Epsomita y Neobor logran mejorar la reacción ante el fuego de los diferentes tipos de madera.

5.1. ENSAYO DE GOTEO

Para llevar a cabo el estudio de este ensayo se han tenido en cuenta tres parámetros importantes: el número de igniciones, el tiempo al que se produce la primera ignición (t_0 ignición) y el tiempo medio de duración de la llama (t_m llama). Se compararán los resultados obtenidos de cada especie de madera con los dos productos utilizados para la impregnación y con la muestra sin tratar.

El objetivo es que en la muestra no se produzca ignición y, en el caso de que lo haga, sea lo más tarde posible y que la duración de la llama sea corta. El número de inflamaciones es generalmente mayor cuanto menor sea la duración media de la llama.

Los resultados obtenidos, tanto de las muestras impregnadas con Epsomita, como de las impregnadas con Neobor, se comparan con las muestras sin tratar.

Tabla 5.1. Resultados ensayos de goteo en pino silvestre.

Pino Silvestre	Nº igniciones	t_0 ignición (s)	t_m llama (s)
Sin tratar	8	34	24
Epsomita (46%)	18	53	11
Neobor (3%)	31	35	5

En las muestras impregnadas con Epsomita se observa que el tiempo de la primera ignición se mejora en un 58% y que el tiempo medio de duración de la llama se reduce un 55%. En las muestras impregnadas con Neobor el tiempo de la primera ignición se mejora en un porcentaje menor que en las anteriores, un 3%. En cambio, el porcentaje de reducción del tiempo medio de la llama es significativamente mayor, un 78%.

Tabla 5.2. Resultados ensayos de goteo en pino laricio-ligero.

Pino laricio-ligero	Nº igniciones	t₀ ignición (s)	t_m llama (s)
Sin tratar	15	46	12
Epsomita (78%)	14	115	5
Neobor (9%)	23	68	4

En las muestras impregnadas con Epsomita se observa que el tiempo de la primera ignición se mejora en un 151% y que el tiempo medio de duración de la llama se reduce un 53%. En las muestras impregnadas con Neobor el tiempo de la primera ignición se mejora en un 49% y el tiempo medio de duración de la llama se reduce un 66%.

Tabla 5.3. Resultados ensayos de goteo en pino laricio-denso.

Pino laricio-denso	Nº igniciones	t₀ ignición (s)	t_m llama (s)
Sin tratar	2	29	205
Epsomita (55%)	5	87	35
Neobor (7%)	5	37	54

En las muestras impregnadas con Epsomita se observa que el tiempo de la primera ignición se mejora en un 200% y que el tiempo medio de duración de la llama se reduce un 82%. En las muestras impregnadas con Neobor el tiempo de la primera ignición se mejora en un 29% y el tiempo medio de duración de la llama se reduce un 73%.

Las muestras de pino laricio-denso, tanto las impregnadas como las que no se han tratado, han reaccionado de forma diferente al resto de tipos de madera durante el ensayo. Se ha observado que las muestras contienen resina en el duramen, además la llama persiste en esta zona, la cual se impregna menos.

Este hecho ha afectado al número de igniciones, de 2 a 5, que es mucho menor que en los demás tipos de madera y también hay gran diferencia entre la duración media de la llama, de 35s a 54s en las muestras impregnadas, respecto a los 3s - 18s del resto de tipos de madera.

Por este motivo y a pesar de haber obtenido unos resultados elevados de mejora respecto a la muestra sin tratar, entendemos que dichos resultados han sido alterados por esta particularidad en las muestras.

Tabla 5.4. Resultados ensayos de goteo en haya.

Haya	Nº igniciones	t ₀ ignición (s)	t _m llama (s)
Sin tratar	21	64	8
Epsomita (20%)	10	99	18
Neobor (7%)	31	79	3

En las muestras impregnadas con Epsomita se observa que el tiempo de la primera ignición se mejora en un 55%, en cambio, el tiempo medio de duración de la llama empeora un 117%. En las muestras impregnadas con Neobor el tiempo de la primera ignición se mejora en un 25% y el tiempo medio de duración de la llama se reduce un 56%.

En lo que se refiere a las muestras de pinos impregnadas con Epsomita, antes de la primera ignición se produce un burbujeo en la superficie de la muestra, durante el ensayo la llama se inicia de forma homogénea en toda la superficie de la muestra y se apaga mediante un parpadeo. En las muestras de haya se produce gran cantidad de humo antes de la primera ignición, como se muestra en la figura 5.1, la llama también se inicia de forma homogénea en toda la superficie de la probeta, pero se apaga de forma instantánea. La parte inferior de la llama es de color azulado y cuando está a punto de extinguirse es totalmente azulada (Figura 5.2).

*Figura 5.1. Humo en muestra de haya impregnada con Epsomita*



Figura 5.2 Llama azul en muestra de haya impregnada con Epsomita

Durante el ensayo de las muestras impregnadas con Neobor, la llama aparece lentamente e incluso parpadeando en alguna ocasión. La ignición se produce con la llama flotando en la superficie de la muestra, como se muestra en la figura 5.3, y se extingue con gran rapidez. Se producen menos humos que en la las muestras de Epsomita antes de la primera ignición. La llama es de color amarillo-naranja durante todo el ensayo.

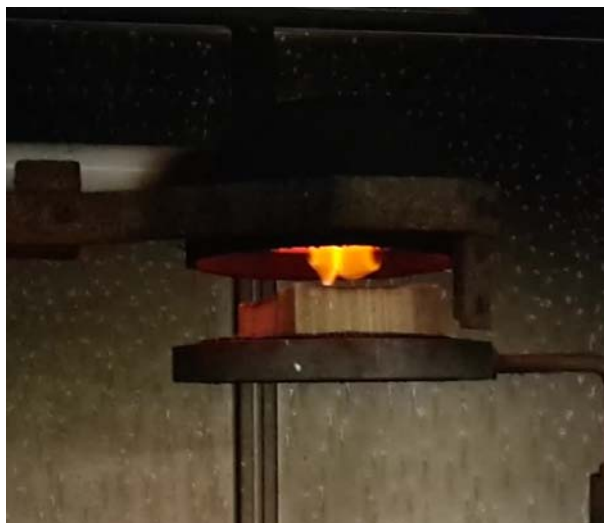


Figura 5.3. Llama flotante en muestra de pino silvestre impregnada con Neobor.

Una vez analizados los resultados del ensayo de goteo, se puede concluir que en general ambos productos producen mejoras en cuanto al número de igniciones, el aumento del tiempo de la primera ignición y la reducción de la duración media de la llama. En el caso de la Epsomita, la liberación de las aguas de composición conforme aumenta la temperatura influye principalmente en el aumento del tiempo en el que se produce la primera ignición. En el caso del Neobor, es su capacidad de crear una capa vítrea, al reaccionar con la temperatura, la que influye sobretodo en el aumento de la velocidad de extinción de la llama.

5.2. ENSAYO CON BUNSEN

Para llevar a cabo el estudio de este ensayo solamente se han tenido en cuenta la temperatura en la cara superior y en la posición central (Tsc), puesto que es la que nos dará información sobre el avance de la temperatura a través de la madera.

En primer lugar, se compararán los resultados obtenidos de cada especie de madera con los dos productos utilizados para la impregnación y con la muestra sin tratar. Por último, se compararán los resultados obtenidos en función del producto utilizado para la impregnación.

En el primer gráfico, Figura 5.4, comparamos las muestras de pino silvestre. La temperatura de la muestra impregnada con Epsomita asciende a partir de los 2 min hasta los 5 min, seguidamente se mantiene a una temperatura constante de unos 75°C ascendiendo lentamente hasta llegar a los 90°C aproximadamente a los 15 min, lo que muestra una mejora respecto a la muestra no tratada que alcanza una temperatura de 140°C en ese tiempo. En cambio, la muestra impregnada con Neobor, en los primeros minutos del ensayo presenta un comportamiento similar a la muestra sin tratar. A partir de los 3 min la temperatura es de 65°C y empieza un ascenso progresivo hasta alcanzar los 150°C a los 15 min.

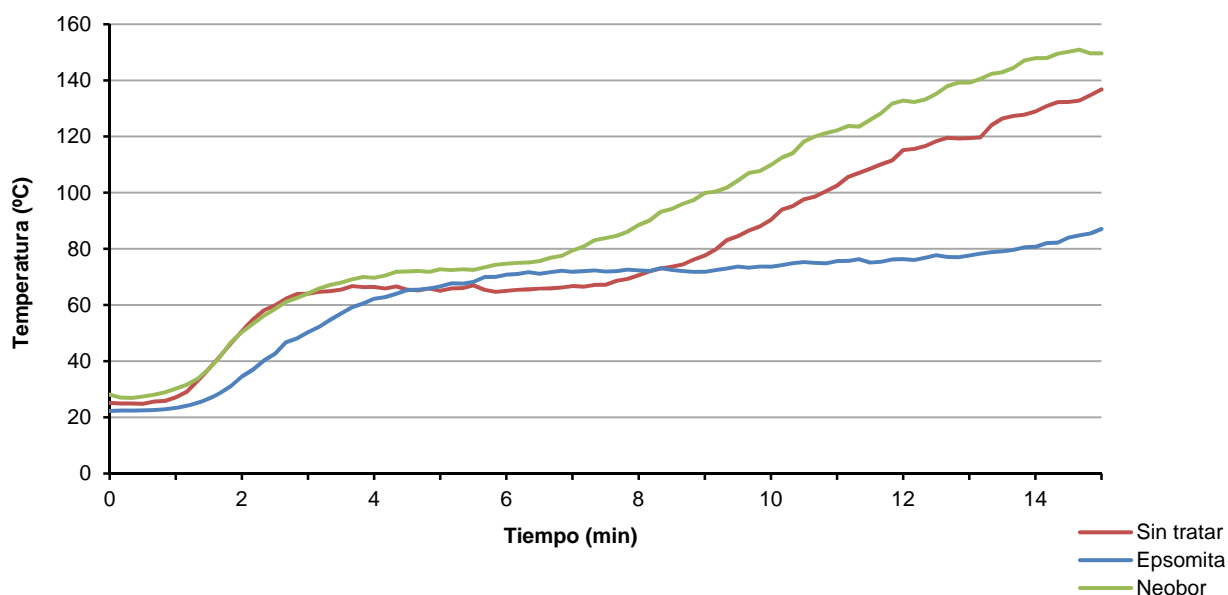


Figura 5.4. Evolución de Tsc de Pino Silvestre

En el pino laricio-ligero, Figura 5.5, la temperatura de la muestra impregnada con Epsomita tiene un comportamiento similar a la de pino silvestre, pero la temperatura final que se alcanza es menor 80°C. En la muestra impregnada con Neobor también se observa la

similitud con la muestra de pino silvestre, pero la temperatura asciende más rápidamente durante todo el ensayo, alcanzando los 200°C a los 15 min.

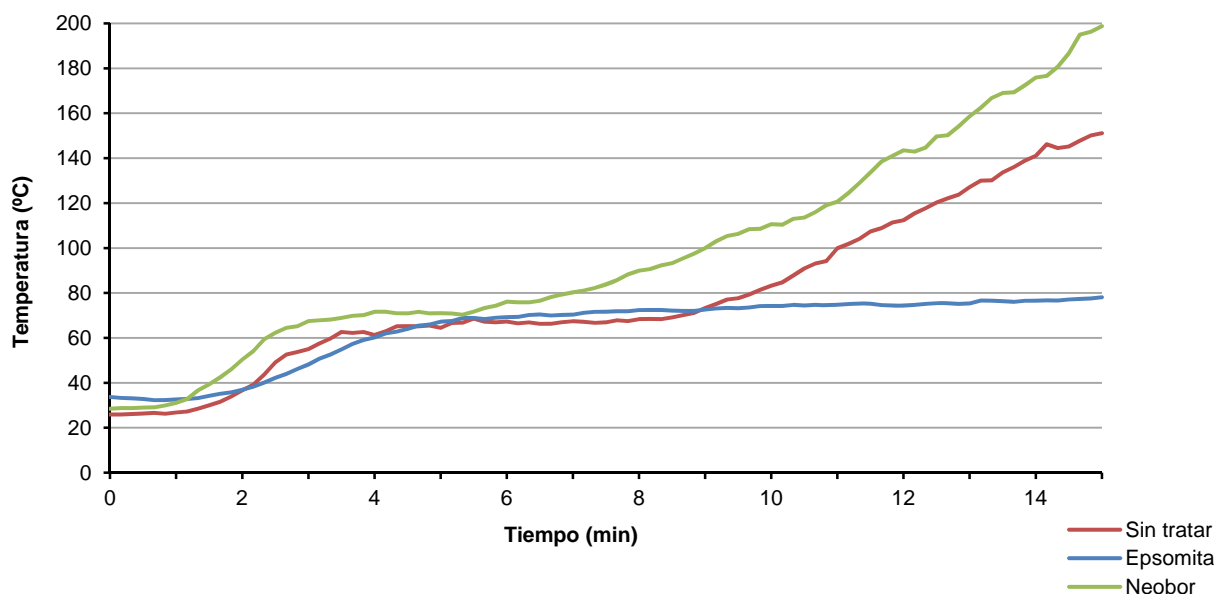


Figura 5.5. Evolución de la Tsc de Pino Laricio-ligero

El pino laricio-denso, Figura 5.6, también se comporta de forma similar a los anteriores. La temperatura en la muestra impregnada con Epsomita asciende de forma más lenta pasando de los 20°C a los 70°C en 4 min. A continuación, estabiliza hasta superar los 80°C a los 15 min. La muestra impregnada con Neobor tiene un comportamiento igual a la muestra sin tratar. Se observa una mejora en los primeros minutos del ensayo, ya que la temperatura tarda 2 min en alcanzar los 70°C, en lugar de 1 min que es lo que tarda la muestra sin tratar.

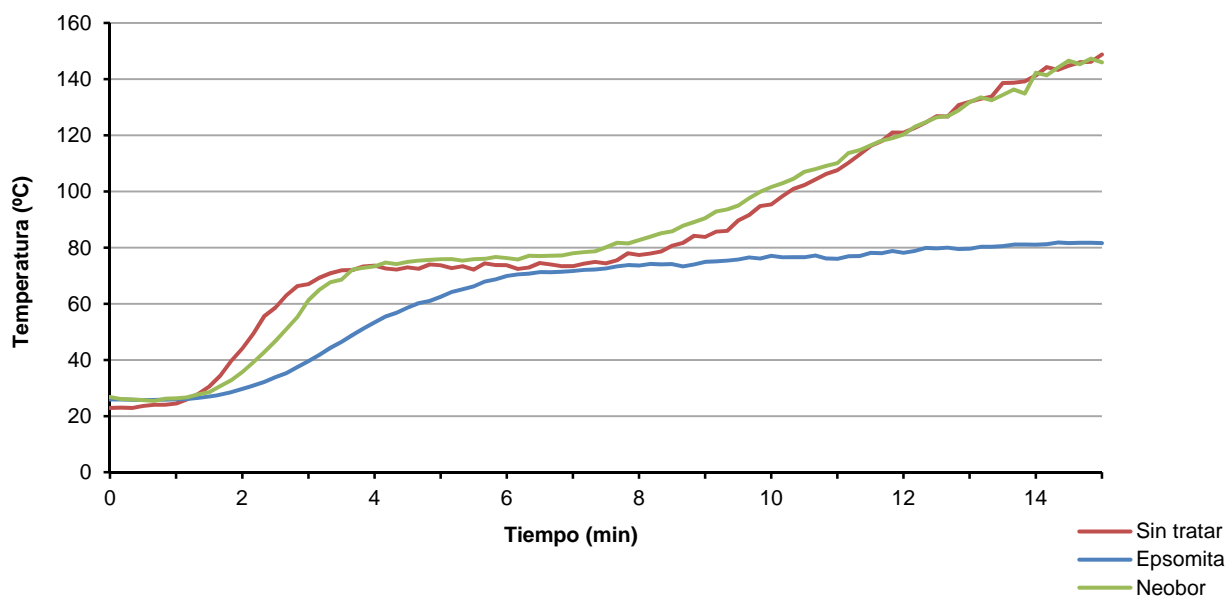


Figura 5.6. Evolución de la Tsc de Pino Laricio-denso

En cuanto a las muestras de haya, Figura 5.7, las impregnadas con Epsomita siguen el patrón explicado en los gráficos de las muestras de pinos, estabilizándose a 70°C aproximadamente y alcanzando los 80°C a los 15 min. La muestra impregnada con Neobor no muestra el periodo de estabilización, llegando a los 130°C progresivamente.

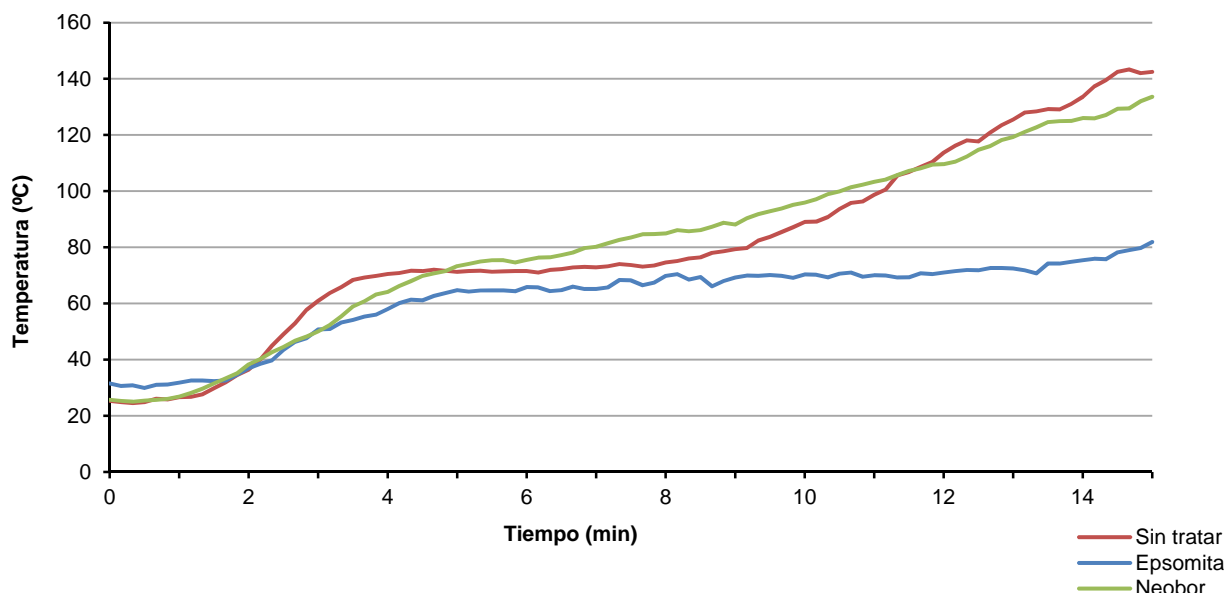


Figura 5.7. Evolución de la Tsc de Haya

Si comparamos las diferentes especies de madera impregnadas con Epsomita, obtenemos el gráfico de la figura 5.8. En él se observa que el comportamiento apenas varía entre ellas, incluso el de la madera de haya, cuya madera tiene una estructura diferente a la del pino. En todas las muestras la temperatura asciende durante los 3 primeros minutos a una temperatura entre 60-70°C en el que comienza un periodo de estabilización hasta los 12 minutos aproximadamente, que es cuando comienza un ascenso progresivo que superará los 80°C a los quince minutos. Se han ensayado algunas de las muestras durante más tiempo y se ha observado que a partir de los 15 min no vuelve a producirse otro periodo de estabilización y la temperatura sigue ascendiendo progresivamente hasta que la muestra se quema por completo.

Al impregnar las muestras con Epsomita se consigue mejorar el periodo de estabilización respecto a las muestras sin tratar, retrasando así, el avance de la temperatura a través de la muestra de madera. Esto se debe a que la Epsomita libera las aguas de forma endotérmica, es decir, su mecanismo de actuación es por un lado liberar un gas no combustible (el agua) que diluye los gases inflamables, y por otro, que al tratarse de una reacción endotérmica está extrayendo calor del medio y por eso la madera necesita más tiempo y temperatura para quemar.

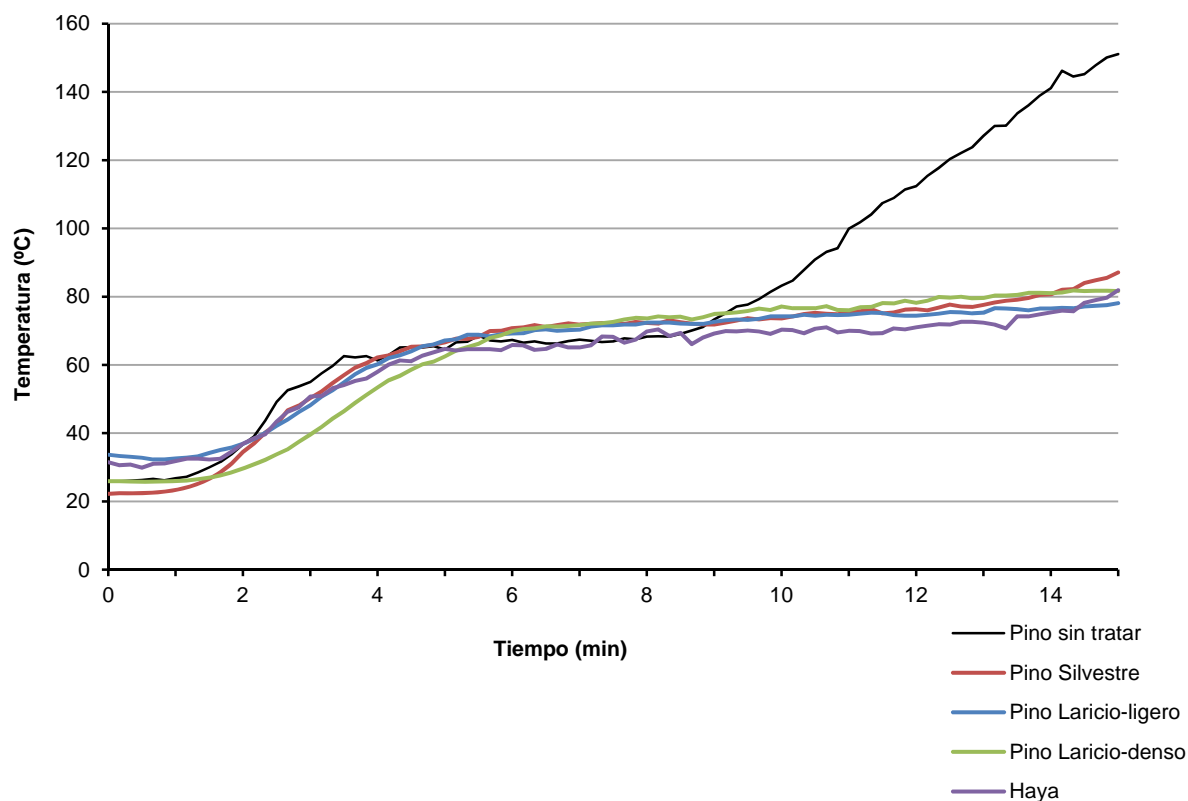


Figura 5.8. Comparativa de Tsc en muestras impregnadas con Epsomita

Al comparar las muestras de las diferentes especies de madera impregnadas con Neobor, obtenemos el gráfico de la figura 5.9. En él también se observa que en todas las muestras el comportamiento es similar, exceptuando la de pino laricio-ligero que aumenta más rápido llegando a los 200°C.

Una de las características del Neobor es que crea una capa vítrea que ayuda a reducir el avance de la temperatura a través de la muestra e impide la salida de gases inflamables. Es posible que el bajo contenido de producto observado en las muestras y la focalización de la llama en un punto de la misma durante el ensayo no favorezcan la formación de dicha capa vítrea. Por este motivo no se observen mejoras en este ensayo y el comportamiento de las muestras impregnadas es muy similar a las muestras no tratadas.

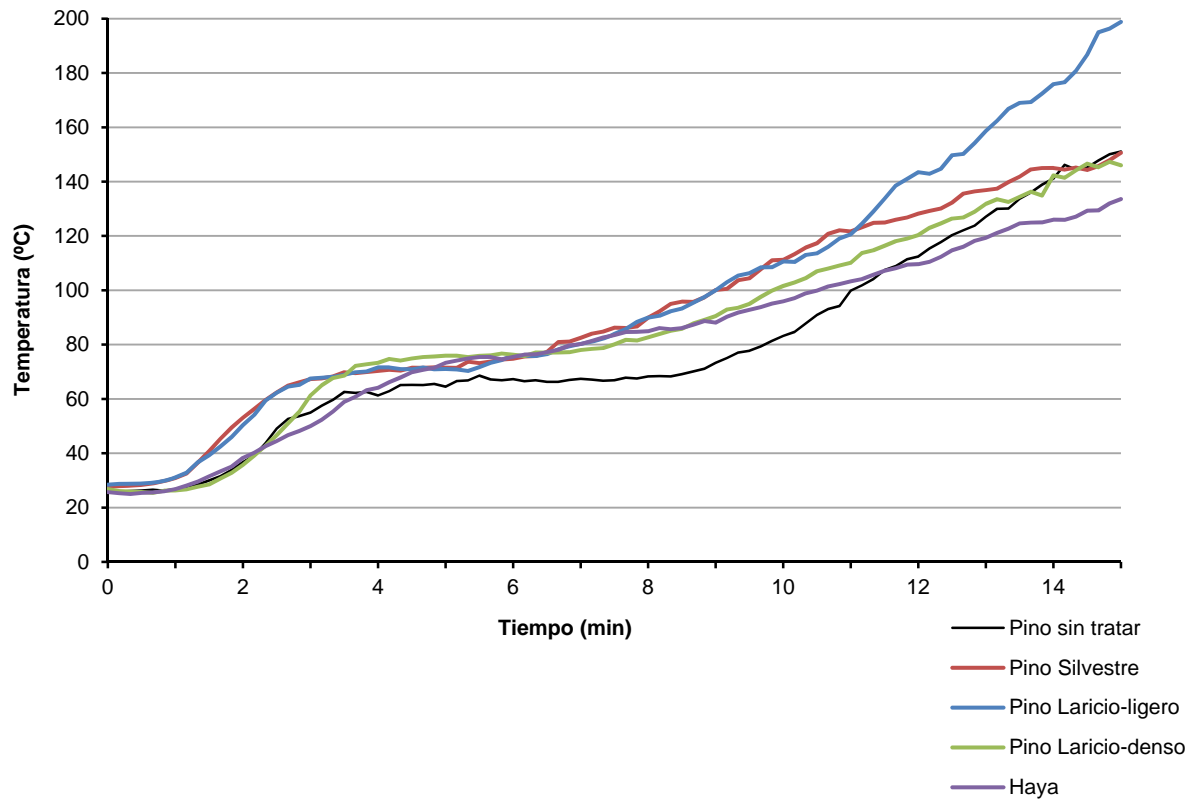


Figura 5.9. Comparativa de Tsc en muestras impregnadas con Neobor



Figura 5.10. Muestras de haya y pino laricio-denso impregnadas con Neobor



Figura 5.11. Muestra de haya impregnada con Epsomita

5.3. ENSAYO DE ÍNDICE DE OXÍGENO (L.O.I.)

Para llevar a cabo el estudio de este ensayo se analiza el porcentaje de oxígeno que soporta la combustión de la madera impregnada. Cuanto mayor sea el porcentaje obtenido, mejor será el comportamiento y la resistencia frente al fuego. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en las muestras impregnadas con Epsomita y Neobor comparados con las muestras sin tratar.

Tabla 5.5. Resultados del ensayo de L.O.I.

Tipos de madera	% Oxígeno		
	Sin tratar	Epsomita	Neobor
Pino silvestre	24,5 – 25,1	40,1 – 41,1	25,5 – 26,0
Pino laricio-ligero	25,5 – 26,0	53,1 – 53,5	30,0 – 30,5
Pino laricio-denso	23,5 – 24,0	40,1 – 41,1	28,5 – 29,1
Haya	22,0 – 22,5	26,5 – 27,1	26,0 – 26,5

Observando los resultados se confirma que todas las muestras impregnadas han mejorado su comportamiento frente al fuego, tanto las de Epsomita, como las de Neobor. El caso del pino laricio-ligero impregnado con Epsomita destaca por encima del resto ya que ha aumentado el porcentaje de oxígeno en un 105% respecto de la muestra sin tratar.

En el resto de muestras impregnadas con Epsomita han mejorado también, pero en un porcentaje menor: el pino laricio-denso un 71%, el pino silvestre un 63% y el haya 20%.

En el caso de las muestras impregnadas con Neobor la mejora respecto a la muestra sin tratar ha sido menos significativa. El pino silvestre un 4%, el pino laricio-ligero y el haya un 17% y el pino laricio-denso un 21%.

En general queda reflejado que cuanto más porcentaje de producto ha penetrado en la madera, mayor es el porcentaje de oxígeno necesario para que se produzca la combustión y, por tanto, la madera soportará mejor la combustión.

Durante el ensayo se ha observado que, las muestras impregnadas con Epsomita, conforme se iba aumentando el porcentaje de oxígeno, se consumían sudando y burbujeando producto como se observa en la figura 5.12.



Figura 5.12. Muestra de pino laricio-ligero impregnado con Epsomita

En las muestras impregnadas con Neobor la llama duraba en torno a 20 segundos, a partir de los cuales, la muestra continuaba incandescente hasta que lograba apagarse completamente.



Figura 5.13. Muestra de pino laricio-ligero impregnado con Neobor

6. CONCLUSIONES

Tras concluir la etapa experimental de laboratorio y realizar el estudio comparativo, resulta gratificante observar que se consiguen los objetivos planteados en un primer momento. En líneas generales las maderas tratadas mejoran su comportamiento al fuego.

En general el producto que mejor ha funcionado, tanto en el proceso de impregnación como en los ensayos de fuego, es la Epsomita.

La elevada solubilidad de la epsomita a temperatura ambiente permite introducir una elevada cantidad de producto en la madera. En el caso del Neobor su baja solubilidad dificulta la impregnación dando valores más bajos.

Hay que tener en cuenta que la estructura microscópica de las especies de madera influye en la capacidad de impregnación. La madera de pino (conífera) tiene una estructura microscópica más sencilla que la madera de haya (frondosa) y esto se ve reflejado en los porcentajes de producto impregnado.

Las maderas tratadas con Epsomita muestran un mejor comportamiento en todos los ensayos de fuego. El caso más favorable es el del pino laricio-ligero, en el que la cantidad de producto impregnado es de 78%. El tiempo al que se produce la primera ignición aumenta de 46 segundos a 115 segundos, retrasa el avance de temperatura a través de la madera 7 minutos respecto a la muestra no tratada y el porcentaje de oxígeno que soporta la combustión de la madera aumenta de 26% a 53,5%.

Esta mejora se debe a la composición de la Epsomita que contiene siete moléculas de agua que se liberan en un rango amplio de temperaturas, diluyendo los gases inflamables y produciendo una reacción endotérmica que absorbe calor del medio. Esto favorece el aumento del tiempo y la temperatura necesarios para que la madera arda.

Las muestras tratadas con Neobor presentan un porcentaje de producto inferior al 10%. Probablemente este es uno de los causas de la poca mejora que se observa en algunos de los ensayos.

A pesar de esto, destaca el ensayo de goteo, en el que se reduce considerablemente el tiempo de duración de la llama en todos los tipos de madera utilizado. Esto se debe a la

capa vítrea que crea el Neobor al aumentar de temperatura, evitando así la salida de gases combustibles y dificultando el acceso al oxígeno.

La epsomita como material retardante de llama ha dado unos resultados interesantes, pero habrá que seguir estudiándola para ver si es viable en condiciones reales en el ámbito de la construcción. En este sentido una de las líneas a seguir es la evaluación del comportamiento al fuego de la madera con un porcentaje menor de Epsomita.

Otra línea de trabajo sería la aplicación de presión en el proceso de impregnación combinada con el vacío que hemos utilizado hasta ahora, para mejorar la impregnación de productos poco solubles y para aumentar la impregnación en las direcciones radial y tangencial.

Así como trabajar con geometrías más parecidas a las reales en el mundo de la construcción, por ejemplo el caso de una viga que tiene muy poca superficie de impregnación en dirección axial que es la más impregnable.

7. BIBLIOGRAFIA

LIBROS:

Peraza Sánchez, F. (2001), *Protección preventiva de la madera*. AITIM, Madrid.

Vélez Muñoz, R. (1968), *La Madera y su resistencia al fuego*. AITIM, Madrid.

Fernández Golfín, J.I., Conde García, M. (2007). *Manual técnico de secado de maderas*. AITIM, Madrid

Arriaga Martitegui, F., Casanovas, X., Ceccotti, A., Giordano, G., Graus, R., Montón, J., Navarrete, A., Palaia, L., Ragazzo, F., Tampone, G., Uzielli, L. (1995). *Manual de diagnosi, patologia i intervenció en estructures de fusta*. CAATB, Barcelona.

Peraza Sánchez, F., Arriaga Martitegui, F., Guindeo Casasús, A., García Esteban, L., Kasner Camacho, C., Medina Gallego, G., de Palacios de Palacios, P., Touza Vázquez, M., (2004), *Especies de maderas*. AITIM, Madrid.

García Esteban L., Guindeo Casasús A., Peraza Oramas C., de Palacios de Palacios P. (2003). *La madera y su anatomía*. Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, AITIM, Madrid.

Vega Catalán L. Llinares Cervera M., Villagrà Fernández C., Gallego Guinea V., González Rodrigo B. (2010). *Guía de Construir con Madera*. Iniciativa de la Confederación Española de Empresarios de la Madera (CONFEMADERA), Madrid.

ARTÍCULOS:

A.Abu-Isa, Ismart. (2002). *Intumescent Thermoplastic Elastomer Fire Shield Material*. Sae The engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space.

De Meijer, M., Thurich, K., Militz, H. (2001). *Quantitative measurements of capillary coating penetration in relation to wood and coating properties*. Wood Science and Technology, 35-45.

Keskin, H. (2007). Effects of Impregnation Materials on Combustion Properties of Laminated Veneer Lumber Obtained from European Oak (*Quercus petraea* Liebl.) and Lombardy Poplar (*Populus nigra* L.).

Marney D.C.O., Rusell, L.J. and Mann, R. (2008). *Fire performance of wood (Pinus radiata) treated with fire retardants and a wood preservative*. Fire and materials, 357-370.

Turner, P., Murphy, R. J. (1998). *Treatment of timber products with borate esters*. Wood science and technology, 25-31.

Lloyd, J.D., Schoeman, M.W. and Stanley, R. (1999). *Remedial timber treatment with borates*. Proceedings of the 3rd international conference on urban pests, Wm H Robinson, F. Rettich and G.W. Rambo (editors), 415-423.

NORMATIVA:

CTE DB-SI. Código Técnico de la Edificación Documento Básico SI: Seguridad en caso de Incendio.

UNE-EN 13501-1:2002. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.

UNE-EN 13501-2:2002. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2: Clasificación a partir de datos obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego excluidas las instalaciones de ventilación.

UNE-EN 13183-1:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.

UNE-EN 13183-2:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.

UNE 23725:1990. Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Ensayo de goteo aplicable a los materiales fusibles. Ensayo complementario.

UNE-EN ISO 4589-2:2001/A1:2006. Determinación del comportamiento al fuego mediante el índice de oxígeno. Parte 2: Ensayo a temperatura ambiente.

PÁGINAS WEB:

<http://www.borax.com> (20 de marzo de 2015).

<http://www.infomadera.net> (27 de febrero de 2015).

<http://www.confemadera.es> (8 de marzo de 2015).

<http://www.natureshift.org> (11 de marzo de 2015).

<http://www.coac.net/oct> (23 de marzo de 2015).

<http://www.lignumfacile.es/> (25 de marzo de 2015).

8. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar dar las gracias a mis tutores, Laia Haurie y Joaquín Montón, por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto, por su ayuda, dedicación incondicional y disponibilidad en todas las etapas del mismo,

Seguidamente, quería agradecer a Juan Carlos Elvira su compañerismo, apoyo y colaboración en la fase experimental del proyecto, así como a Josep María Chimenos y Joan Formosa por su colaboración desde la Facultad de Química de la Universidad de Barcelona

Por último, quiero agradecer a mi familia, que siempre me ha apoyado en todo lo que he necesitado durante la carrera y ha estado a mi lado durante todo este proceso.

9. ANEXOS

Colección de 73 fichas de trabajo de las muestras ensayadas, en las que se especifica el tipo de muestra, sus características, el tratamiento y ensayos realizados y los resultados obtenidos.